

出版編號：SWCB-107-268

透水式固床工之工法研發與水理特性研究 (三)

Innovation of permeable groundsills and assessment of its hydraulic characteristics (III)

執行單位：國立屏東科技大學

執行期間：107 年 02 月 09 日至 107 年 12 月 31 日

計畫主持人：吳嘉俊 教授

研究人員：沈珮君、許湘晴、黃芊華

協助人員：蕭力維、賴漳聰、李宸漢

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 107 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考)

目次

目次.....	I
表次.....	III
圖次.....	IV
第一章 前言.....	1-1
第一節 已完成之重要成果	1-6
第二節 計畫目標	1-8
第二章 前人研究	2-1
第一節 固床工間距相關研究	2-1
第二節 橫向構造物之淘刷相關研究	2-5
第三節 橫向構造物改良之相關研究	2-12
第四節 生態水力學 (ECOHYDRAULICS) 之相關研究	2-15
第三章 試驗材料與方法	3-1
第一節 試驗材料	3-1
第二節 前兩年度透水式固床工之設計緣起與構想	3-4
第三節 本年度透水式 E 型固床工之設計緣起與構想.....	3-8
第四節 水工試驗模型比例及方法	3-13
第五節 資料分析	3-16

第四章 結果與討論	4-1
第一節 水流流況、土砂運移與水理特性	4-1
一、傳統式固床工.....	4-1
二、透水式 A 型固床工	4-5
三、透水式 B 型固床工	4-9
四、透水式 C 型固床工	4-13
五、透水式 D 型固床工	4-16
六、透水式 E 型固床工.....	4-19
第三節 資料分析	4-25
第四節 透水式固床工之可行性評估	4-30
第五章 結論與建議	5-1
參考文獻.....	參-1
附錄.....	附錄-1

表次

表 1 水工試驗參數	3-13
表 2 固床工趾部淘刷坑形狀特徵複迴歸方程式	4-28
表 3 固床工趾部淘刷坑形狀特徵複迴歸方程式 (續)	4-29

圖次

圖 1 格柵透水式固床工試做案例-台東縣羊橋溪.....	1-5
圖 2 格柵透水式固床工後方土砂淤積.....	1-5
圖 3 不同帶工間距下、帶工趾部渠床淘刷型態 (WU ET AL., 2002).	2-3
圖 4 試驗渠槽與系列固床工模型配置示意圖.....	3-2
圖 5 試驗床砂之粒徑分佈.....	3-4
圖 6 透水式 A 型固床工模型.....	3-5
圖 7 透水式 B 型固床工模型.....	3-6
圖 8 透水式 C 型固床工模型.....	3-7
圖 9 透水式 D 型固床工模型.....	3-8
圖 10 滑流 (SKIMMING FLOW) 示意圖 (SOURCE: URBAN CLIMATE CHANGE)	3-9
圖 11 透水式 D 型固床工通透結構迎水面之結構近照	3-11
圖 12 透水式 E 型固床工通透結構之近照	3-12
圖 13 固床工趾部局部淘刷之特徵幾何參數示意圖	3-15
圖 14 固床工間之渠床與水面高程量測斷面位置示意圖	3-15
圖 15 局部淘刷及渠床 3D 掃描量測設備配置	3-15
圖 16 傳統式固床工於其後方未淤滿時的水流示意圖	4-2

圖 17 傳統式固床工趾部渠床局部淘刷發展示意圖	4-4
圖 18 傳統式固床工渠床床型之全貌.....	4-5
圖 19 透水式 A 型固床工通透結構體之空隙分布	4-6
圖 20 透水式 A 型固床工渠床床型之全貌 (部分阻塞).....	4-7
圖 21 透水式 A 型固床工渠床床型之全貌 (完全阻塞)	4-8
圖 22 透水式 B 型固床工於試驗初期時的水流與淘刷機制示意圖 ...	4-10
圖 23 透水式 B 型固床工間淘刷坑交錯發展的情形	4-11
圖 24 透水式 B 型固床工間渠床淘刷之發展	4-12
圖 25 水流溢淹漫過透水式 C 型固床工造成投潭的情形	4-14
圖 26 透水式 C 型固床工保護下渠床的淘刷結果	4-16
圖 27 水流穿過透水式 D 型固床工時的情形	4-17
圖 28 透水式 D 型固床工溢流投潭及淘刷結果	4-18
圖 29 透水式 D 型固床工保護下渠床的淘刷結果	4-18
圖 30 市售漁業用貫穿式浮球.....	4-20
圖 31 水流通過透水式 E 型固床工通透體時所產生的擴散現象 ...	4-21
圖 32 透水式 E 型固床工於數種試驗條件下之土砂堆積情形	4-22
圖 33 透水式 E 型固床工通透結構體內的土砂阻塞情形	4-23
圖 34 描述固床工趾部局部淘刷之特徵參數	4-25
圖 35 淘刷坑深長比與福祿數關係圖	4-31

圖 36 淘刷坑深長比與水力坡降關係圖	4-31
圖 37 淘刷坑深長比與土砂顆粒移動性關係圖	4-32
圖 38 傳統式與透水式 A 型固床工之工程數量計算成果	4-33
圖 39 日本千葉縣透水式固床工案例一	5-3
圖 40 日本千葉縣透水式固床工案例二	5-4
圖 41 日本千葉縣透水式固床工案例三	5-4

第一章 前言

水土保持的業務除水土資源保育之外，治山防災亦為重點；其中野溪整治為治山防災重點業務項目之一。針對野溪整治的訴求，過去多以抑制溪床縱向淘刷為優先考量，近年來由於自然生態及環境保育觀念的重視，如何精進野溪整治所加設之橫向構造物 (transverse structures) 的設計，以符合安全、保全與生態環境友善等要求，已成為現階段治山防災的重點。

溪流整治常用的橫向構造物，其主要功能在於減緩溪床坡降、穩定流心、防止溪床縱向淘刷、橫向侵蝕、溪岸崩塌 (水土保持手冊，2005)，並依設計功能的需求，橫向構造物甚至具備調節河道泥砂的功能。基於其減緩溪床坡降的功能，橫向構造物亦可自英文原文的 grade-control structure 直譯為坡降控制構造物；國內則依據橫向構造物的有效高度進行分類，而衍生出防砂壩 (check dam)、潛壩 (submerged dam)、固床工 (groundsill) 等構造物；部份地區甚至將緊貼於溪床表面的橫向構造物稱之為帶工。

國內過去對於「固床工」及「帶工」的定義區分，乃是建構於構造物頂部凸出溪床表面的高度與溢流口設置之有無之上。若構造物頂部高程與設計溪床線齊平且不設置溢流口者，稱之為帶工或潛檻。若構造物頂部突出於溪床者，稱之為固床工 (李木青，1992)。

2017 年版的水土保持手冊將固床工定義為「係以保護溪床免於被洪水沖刷下切為目的所構築有效高度在 1.0 m 以下之橫向阻水構造物。依據其實施目的，固床工有效高度可以略低於溪床、或與溪床齊平、或略高於溪床面」。無論使用名稱之多樣，橫向構造物已證實可以於治山防災工作中發揮防災、減災的功能。

然而因為固床工的構築橫互於溪流當中，將溪床分隔成區間，使得水生生物棲息環境因此發生改變，其中最大的改變當屬溪流流況、固床工下游溪流深潭 (pool)、淺灘 (riffle) 與湍瀨 (run) 的失衡，以致水棲生物族群改變，最後導致溪流食物鏈瓦解 (Biedenharn and Hubbard, 2001)。

除此之外，固床工趾部的局部淘刷 (local scour) 亦為一直困擾工程設計單位的問題，而固床工趾部的局部淘刷甚至可能衝擊固床工基礎的安全。造成固床工趾部局部淘刷的水力因素，在於固床工頂緣與其下游溪床間高程落差所形成投潭水流的投潭效應 (plunge-flow effect)。

自 2003 年開始，國內引進並積極推動「近自然生態工法 (near-nature ecologic engineering)」的觀念。就野溪整治而言，近自然生態工法之預期目標在於改變傳統治理的工法及工法的設計邏輯，並朝向「表面粗糙化」、「壩高低矮化」、「岸坡平緩化」、「材質自然化」及「施

工經濟化」等方向努力。開口式防砂壩、魚梯、踏步式固床工、開口式固床工及透水式鋼結構等，均為野溪整治朝向「五化」發展的產物。

為解決固床工趾部局部淘刷及沿溪縱向生態廊道不連續的問題，國內出現多種改良型的固床工型式；其中包括：(1) 斜坡式混凝土鋪石固床工——係於鋼筋混凝土上鑲嵌塊石構成 10~ 15%為原則的緩斜坡蓆墊，蓆墊面上以中徑 30~ 50 cm 的塊石排砌或植入，並預留低水流量之水道、(2) 階梯式固床工——係將固床工下游做成階梯狀，以跌水的方式削減水流能量，以利魚類上溯。固床工下游面之平均坡度以緩於 13%為設計原則，階梯間之高差以不超過 30 cm 為宜、(3) 石樑固床工——係利用足以抵抗水流拖曳力之大石塊作為力石，與較小之連結石緊密聯成一個整體，形成類似拱形結構體、(4) 階段式固床工——係沿著溪流將固床工構築成具有落差之型式，階段間之落差以不超過 30cm 為宜。階段式固床工常以混凝土材料構築，且在固床工下游填鋪塊石以消減水流勢能、(5) 踏步式固床工——係於傳統式固床工沿固床工軸線方向開設多個開口，形成低水流路，以確保低流量時水流流路的暢通、(6) 複式斷面固床工——係在具有常流水之溪流中，將固床工設計成複式斷面，使在枯水期低流量時，可以將水流集中，避免水流分散、水深太淺而影響魚類迴游；當豐水期高流量時，可達到穩定流心及降低水流偏移、衝擊溪岸之功能（水土保持局，2003）

國內過去亦曾經有嘗試試用透水式固床工的案例，如圖 1 所示，該案例乃是將傳統式固床工出露溪床的結構體改以鋼軌或 H 型鋼等材料築框，以形成格柵。格柵透水式固床工的設計理念，在於 (1) 增加土砂通過的機會，以減少土砂於固床工後方的堆積、(2) 降低投潭水流的高程落差、(3) 提供水棲生物棲息或躲藏的空間。

雖然於現場調查中，曾經發現溪蟹利用鋼軌格柵與柵內回填塊石的間隙做為活動及躲藏空間的現象，但由於大部分的格柵多已出現土砂淤積，如圖 2 所示，使得溪蟹活動的空間仍多侷限於格柵透水式固床工的下游縫隙。除此之外，格柵透水式固床工趾部的局部淘刷現象並沒有因為格柵的構築而有所改善。

因此，本計畫的目的，在藉由室內水工縮尺試驗，以不同通透率之透水式固床工模型，瞭解透水式固床工於不同通透率情況下對於溪流水理現象的影響，並探討透水式固床工的可行性，進而研發較為適宜的透水式固床工構造，以達到野溪整治之安全、保全、永續的最終目標。



圖 1 格柵透水式固床工試做案例-台東縣羊橋溪



圖 2 格柵透水式固床工後方土砂淤積

第一節 已完成之重要成果

第一年(105 年度)：

1. 完成透水式 A 型固床工、透水式 B 型固床工的模型設計。

透水式 A 型乃是參考台東縣東河鄉羊橋溪及屏東縣來義鄉內社溪上游現場的 H 型鋼框內填塊石的實物進行縮尺，縮尺模型之通透結構體的通透度為 7%。

透水式 B 型的通透結構體，則是依據透水式 A 型之通透結構較易被上游土砂堵塞所進行的改良型，採二排陣列式方型箱涵設計，其目的在於增加通透結構的通透率，且方型箱涵的內部尺寸均大於試驗用砂的最大粒徑，通透結構體的通透度為 68%。

2. 完成傳統式、透水式 A 型、透水式 B 型固床工的水工試驗，試驗參數包含：流量、渠道坡降、渠床床質代表粒徑、固床工通透度等。流量、渠道坡降、床質粒徑、固床工通透結構體之通透度均採用 3 個不同的範圍，共計 81 種組合，每一種試驗組合採用 5 重複。

3. 完成試驗資料的初步整理。試驗資料的整理包含：(1).固床工趾部的最大淘刷深度、(2).最大淘刷深度發生位置、(3).固床工趾部淘刷坑的平均長度、(4).淘刷坑之淘刷體積、(5).相鄰兩固床工間各量測斷面的水深，以及(6).固床工頂緣的平均水深等。

第二年(106 年度)：

1.完成透水式 C 型固床工、透水式 D 型固床工的模型設計。

透水式 C 型乃是考量未來現場實作的方便性，以 H 型鋼軌框內填置網籠，以 H 型鋼軌框保護網籠，避免網籠軟性材料易受上游來砂撞擊而破壞、但又維持通透結構體的通透度，透水式 C 型固床工通透結構體的通透度為 32%。H 型鋼軌框架乃是沿用透水式 A 型的結構體，至於網籠則按比例縮小製作。

透水式 D 型固床工之通透結構體乃是結合透水式 A 型及透水式 B 型的個別特色，取透水式 B 型高通透率的陣列式方型箱涵優點，但改以單排五孔管涵陣列為之，管涵陣列之間則以塊石填充，其目的在改變陣列管涵迎水面的整齊劃一，同時改變水流的流動特性與流速，並利用填充塊石之間較大的通透孔隙，增加上游來砂通過的機會，藉以降低固床工的水頭高度，減少溢流水的投潭力道，透水式 D 型固床工通透結構體的通透度為 50%。

2.完成透水式 C 型及透水式 D 型固床工的水工試驗，試驗參數與第一年度相同，包含：流量、渠道坡降、渠床床質代表粒徑、固床工通透度等，共計 54 種組合，每一種試驗組合採用 5 重複。

3. 完成第一年度傳統式、透水式 A 型及透水式 B 型試驗資料的細部分析。細部分析的方法，乃利用因次分析 (Dimensional Analysis)

先找出影響固床工趾部淘刷之規模的影響因子，再利用複迴歸分析，獲得固床工趾部渠床局部淘刷的無因次淘刷坑深長比 (Depth-Length Ratio; DLR) 之複迴歸公式。

第二節 計畫目標

1. 全程目標：

- (1) 瞭解透水式固床工的水理特性，以提出其對於溪床水域環境的影響。
- (2) 提出透水式固床工用於野溪治理的可行性評估。
- (3) 利用水工試驗之結果，提出透水式固床工的設計建議，以做為實務施作之設計參考。

2. 本年度目標：

- (1) 根據前二年度對於四款透水式固床工水工試驗的觀察、水理特性與優缺點的瞭解，設計透水式 E 型固床工，並進行模型試驗。
- (2) 綜合整理前二年度的試驗數據，提出無因次複迴歸公式，以做為實務設計與固床工趾部局部淘刷規模預測的學理與應用依據，最後提出透水式固床工的設計建議。

第二章 前人研究

過去國內外進行透水式固床工相關試驗研究的案例甚少，與固床工相關的試驗研究大多集中於固床工間距、固床工趾部的局部淘刷、固床工的設計改良等研究上，而主要研究的目的乃是(1).為了尋求較適宜的固床工間距，用以控制溪床的縱向淘刷，(2).改良固床工設計之目的在於嘗試減少固床工趾部的局部淘刷。

第一節 固床工間距相關研究

張則安 (1994) 假設阻力係數具有可加性，乃利用 3 組均勻砂及 2 組非均勻砂進行清水流之室內動床淘刷試驗，以探討固床工的形狀阻力 (form resistance) 與設置密度之關係，進而推導出固床工間距的推估公式如下：

$$\frac{L}{L_0} = 10^{9.8} \left(\frac{h}{R} \right)^{-3.46} \left(\frac{\nu}{UR} \right)^{-5.1} \left(\frac{gR}{U^2} \right)^{-3} \left(\frac{\tau_g}{\rho U^2} \right)^{-3.9} \quad [1]$$

式中， L = 固床工間距 (m)、 L_0 = 固床工設置段之總長 (m)、 h = 固床工高 (m)、 R = 水力半徑 (m)、 ν = 流體運動粘滯係數 (m^2/s)、 U = 流速 (m/s)、 g = 重力加速度 (m/s^2)、 τ_g = 固床工形狀阻力 (N/m^2)、

ρ = 流體密度 (kg/m^3)、 $\left(\frac{v}{UR}\right)$ = 雷諾數 (Reynolds Number) 倒數、 $\left(\frac{gR}{U^2}\right)$ = 福祿數 (Froude Number) 平方倒數。

游繁結 (1996) 自 1993 年至 1995 年辦理行政院農業委員會委託「固床工間距之調查與研究」計畫，經由水工模型試驗及現場調查，推導出固床工的間距公式。現場調查包含台東及台中市大坑附近設有固床工的野溪共計 28 條，現場調查項目包含固床工間距、固床工有效高度及厚度、固床工下游沖刷長度及深度、溪床寬、水深、溪床坡度、床質粒徑等。水工模型試驗則採加砂試驗，試驗參數包含流量、固床工間距、固床工高度、床質粒徑、坡度等 5 項，最後得到以下的固床工間距設計公式：

$$L = 4.67 \frac{d_{65}^{0.14}}{H^{0.73} S^{0.45}} \quad [2]$$

式中， L = 固床工間距 (m)、 d_{65} = 累積通過 65% 之床質代表粒徑 (m)、 H = 設計水深 (m)、 S = 原溪床坡度 (%)。

劉世昌 (1997) 以台東 8 條採用帶工進行整治之野溪，進行帶工下游淘刷坑幾何形狀的調查與分析，訂定出適用於台東海岸山脈泥岩地不同床質粒徑的帶工間距設計公式：

$$L = \frac{100 \times H}{1.2 + 1.5 \times S} \quad ; \quad \text{床質粒徑偏大者} \quad [3]$$

$$L = \frac{100 \times H}{4.5 + 1.1 \times S} \quad ; \quad \text{床質粒徑偏小者} \quad [4]$$

式中， L = 帶工間距 (m)、 H = 帶工設計高度 (m)、 S = 設計坡度 (%)。

吳嘉俊 (2001) 自 1998 年至 2000 年辦理行政院農業委員會委託「固床工間連續帶工間距之研究」計畫，以 1:50 縮尺之水工模型試驗，探討不同流量、溪床床質代表粒徑、溪床坡降、帶工間距等參數與帶工下游溪床淘刷的影響。試驗中除量測帶工下游溪床淘刷之幾何斷面外，更利用微型皮托管 (Pitot tube) 量測於不同流量、帶工間距及溪床坡度組合下相鄰兩帶工間的流速分布。藉由 576 組水工模型試驗，將帶工下游溪床淘刷之幾何形狀歸納分類成淘刷 S 型、淘刷 M 型、淘刷 L 型等三種，如圖 3 所示。

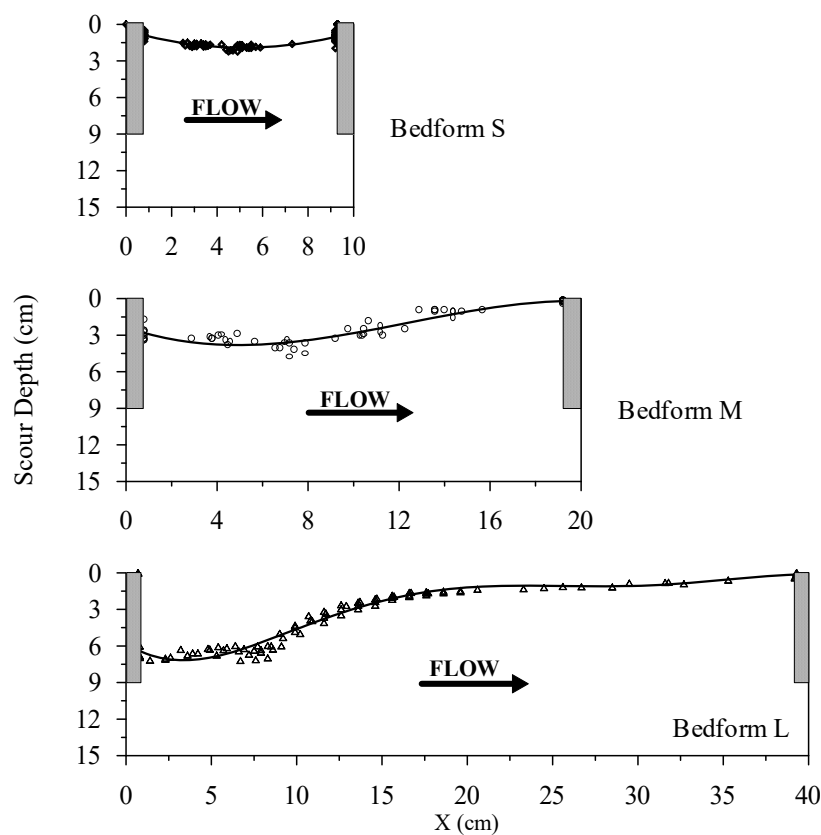


圖 3 不同帶工間距下、帶工趾部渠床淘刷型態 (Wu et al., 2002)

淘刷 S 型、M 型及 L 型等三種床型的發生，反映出帶工間距對於整治後溪流水理的影響。當帶工間距較密時，越頂而過的溪水會因為下游緊鄰帶工的存在所產生之迴水效應 (backwater effect) 而潛入流速較低的迴水層，使得水流流速下降，形成潛流水躍 (submerged-hydraulic jump)，進而影響結構物趾部之溪床淘刷坑的發展。當帶工間距增加後，下游相鄰帶工所產生之迴水效應會因此而下降，使得迴水對越過帶工的溪水的消能作用受限，進而提供淘刷坑發展的機會。

雖然如此，當水流流量增加時，倘若相鄰兩帶工的間距仍足以提供足夠的迴水效應，且迴水長度涵蓋相鄰兩帶工的間距時，就水理特性而言，溢流水不再具備投潭水流的特性，此時的水理特性與 Vischer & Hager (1998) 所著 Dam Hydraulics 中提及的似投潭水 (pseudo-plunge flow) 相符。

就淘刷 L 型而言，當實物帶工之間距長達 20 m 時，下游緊鄰帶工所產生的迴水效應無法涵蓋上游帶工的基礎，此時，越過上游帶工頂的溪水無法因迴水效應而獲得消能，進而直接對下游溪床投潭並產生淘刷。

經由室內水工模型試驗，並以構造物基礎安全為優先考量，吳嘉俊 (2001) 提出最適帶工間距的設計公式如下：

$$L_I = 48.872 \frac{H}{\tan^2 \varphi} \left(\frac{Q}{\sqrt{Bh(S_g - 1)gSD_{50}^3}} \right)^{-0.399} \quad [5]$$

式中， L_I = 帶工間距 (m)、 H = 帶工高度 (或帶工埋入深度；m)、 φ = 溪床床砂之水中安息角(°)、 Q = 設計洪峰流量 (cms)、 S_g = 溪床床砂比重 (specific gravity)、 B = 溪流整治段之幅寬 (m)、 h = 設計流量下整治段之正規水深 (normal depth; m)、 g = 重力加速度 (m/s²)、 S = 溪床水力坡降、 D_{50} = 溪床床砂之中值粒徑 (m)。公式中

$$\begin{aligned} \frac{Q}{\sqrt{Bh(S_g - 1)gSD_{50}^3}} &= \frac{\rho Q^2}{\rho Bh(S_g - 1)gSD_{50}^3} = \frac{\rho Q(VA)}{\rho(S_g - 1)gSD_{50}^3 Bh} \\ &= \frac{\rho QV}{\rho(S_g - 1)gSD_{50}^3} = \frac{\dot{m}V}{m_s gS} = \frac{m\dot{V}}{m_s gS} = \frac{ma}{m_s gS} \end{aligned} \quad [6]$$

所代表的物理意義為，水流作用力與溪床床砂之自重沿溪床床面方向分力之比值。

第二節 橫向構造物之淘刷相關研究

連惠邦 (2001) 利用室內渠槽試驗，探討防砂壩之防砂功能及其下游河床演變與固床工整流的功能。研究成果指出防砂壩「上淤下沖」及固床工「先緩後沖」的泥砂輸移特性，並提出「產砂區位轉移效應」的觀念。該觀念係指防砂壩與其下游固床工不僅能夠將河流土砂生產

區位轉移至下游，而且可以將河流上游土砂災害之高潛勢區移至下游低潛勢區河段。經由不同固床工間距、渠槽坡降、流量、固床工下游沖刷率及水流功率的分析，推導出固床工沖刷減少率公式如下：

$$\frac{S_{r0} - S_r}{\sqrt{gL}} = 8 \times 10^{-5} \left(\frac{W - W_c}{W_c} \right)^{0.83} \left(\frac{L_0 - L}{L_0} \right)^{2.81} S^{1.23} \quad [7]$$

式中， S_{r0} = 未設置固床工時之河床平均沖刷率、 S_r = 設置固床工後之平均沖刷率、 L_0 = 河段長度、 L = 固床工間距、 W = 水流功率、 W_c = 泥砂顆粒臨界起動功率、 S = 河床平均坡降。

Gaudio et al. (2000) 利用水工模型試驗，探討固床工下游的淘刷情形。Gaudio et al. 認為固床工下游淘刷坑的最大淘刷深度 (y_s) 與下列參數有關：

$$y_s = f(g, \nu, \rho, \rho_s, q, q_s, h_u, D_{50}, a_l) \quad [8]$$

式中， q = 單寬流量、 q_s = 單寬土砂流量、 h_u = 正規水深、 D_{50} = 床質中值粒徑、 a_l = 型態落差 (morphological jump) = $(S_o - S_{eq})L$ ； S_o = 原設計坡降、 S_{eq} = 平衡輸砂坡降、 ρ = 流體密度、 ρ_s = 土砂密度。

Gaudio et al. 水工模型試驗的設計，乃是令相鄰兩固床工的間距具足夠的長度，使下游相鄰固床工不會影響到上游淘刷坑的發展。經由水工模型試驗，Gaudio et al 提出固床工下游淘刷坑深度 (y_s) 及淘刷坑長度 (l_s) 與臨界比能 (critical specific energy) 的比例公式如下：

$$\begin{aligned}\frac{y_s}{H_s} &= 0.189 \frac{a_1}{\Delta D_{50}} + 0.266 \\ \frac{l_s}{H_s} &= 1.87 \frac{a_1}{\Delta D_{50}} + 4.02\end{aligned}\quad [9]$$

式中， H_s = 臨界比能、 Δ = 泥砂之水中比重量 = $(S_g - 1)$ 。在使用上述公式之前，必須先利用輸砂公式及 Shields 泥砂起動運動關係圖 (Shields' diagram)，找出該整治河道段的平衡輸砂坡降 S_{eq} 。

陳聖文 (2000) 以變換不同渠槽傾角、搭配定量流的方式，針對帶工投潭水流的沖刷進行研究，並提出最大沖刷深度、跌水數、坡度、帶工長度與水流沖擊位置的經驗公式。研究結果發現，帶工能使泥砂沖刷的體積減小，且沖刷坑的平均最大刷深量減小 58%、水流作用力衰弱約 32~35%、能量消減約 58%。但是當渠床坡度變陡時，投潭水流的沖刷潛能及沖擊力會變大，導致泥砂較易受水流沖刷而帶動，因而使得沖刷現象加劇。

吳尚訓 (2000) 藉由清水流之渠槽試驗，探討固床工設置前後的泥砂運移情形，並透過不同保護範圍下泥砂體積變化的分析，瞭解固床工設置對河床穩定的效果。研究結果指出，隨著固床工間距的減小，可有效抑制部分床砂的運移，進而減緩河床的沖刷。除此之外，並採用水流功率與臨界啟動功率的觀念，推求平均沖刷率與其他相關因子之關係式如下：

$$\frac{S_{ra}}{\sqrt{gh}} = 2.9 \times 10^{-4} \left(\frac{W - W_c}{W_c} \right)^{0.86} \left(\frac{L}{L_o} \right)^{0.37} S^{1.28} \quad [10]$$

2 - 7

式中， S_{ra} = 河床平均冲刷率、 W = 水流功率、 W_c = 泥砂顆粒之臨界起動功率、 L = 固床工間距、 L_o = 固床工保護段長度、 S = 渠槽坡度。

Lenzi et al. (2002) 延續 Gaudio et al. (2000) 的研究並將研究成果試用於坡度陡峻的山區野溪，更利用水工模型試驗進行驗證。研究結果發現，固床工下游的淘刷坑深度及長度與水工模型試驗所採用床砂 D_{95} 粒徑所計算之密度福祿數 (Densimetric Froude Number) 相關性最高，並且 D_{95} 的大小約略等於最終淘刷坑坑內床砂粒料之中徑，最終推導出固床工下游淘刷坑深度 (y_s) 及淘刷坑長度 (l_s) 與臨界比能 (H_s) 的公式如下：

$$\frac{y_s}{H_s} = 0.4359 + 1.4525 \left(\frac{a_1}{H_s} \right)^{0.8626} + 0.0599 \left(\frac{a_1}{\Delta D_{95}} \right)^{1.4908} \quad [11]$$

$$\frac{l_s}{H_s} = 4.479 + 0.023 \left(\frac{a_1}{H_s} \right)^{-1.808} + 2.524 \left(\frac{a_1}{\Delta D_{95}} \right)^{1.129} \quad [12]$$

式中， H_s = 臨界比能、 Δ = 泥砂之水中比重量 = $(S_g - 1)$ 、 a_l = 型態落差 = $(S_o - S_{eq})L$ ； S_o = 原設計坡降、 S_{eq} = 平衡輸砂坡降、 D_{95} = 累積通過 95% 之床質代表粒徑 (m)。

結合設計洪峰流量、整治段溪幅之單寬流量 (unit-width flow rate)，同時考慮溪床淘刷坑幾何形狀特性與不同型態之水躍機制，Wu et al. (2002) 將前述吳嘉俊 (2001) 研究資料進行重新整理，獲得帶工下游淘刷坑幾何形狀公式如下：

$$Y = \left(\frac{d_{sc}}{L_{sc}} \right) = f(\Pi) = 2.7046 \left(\frac{1}{(S_g - 1)D_{50}SL_I} \sqrt[3]{\frac{q^4}{g^2}} \right)^{-0.3384} \quad [13]$$

式中， d_{sc} = 帶工下游溪床最大淘刷深度 (m)、 L_{sc} = 帶工趾部至最大淘刷深度的水平距離 (m)、 q = 整治段的單寬流量 (cms/m)、 S_g = 床砂比重、 g = 重力加速度 (m/s²)、 S = 水力坡降、 D_{50} = 床砂中值粒徑 (m)。

除此之外，Wu et al. (2002) 獲得系列帶工群之帶工間距設計公式如下：

$$L_I = \frac{0.156 \cdot q^{1.333}}{(S_g - 1)D_{50}S} (\tan \phi)^{0.3384} \quad [14]$$

式中， L_I = 帶工間距 (m)、 ϕ = 溪床床砂之水中安息角(°)、 q = 設計單寬流量 (cms/m)、 S_g = 溪床床砂比重、 S = 溪床水力坡降、 D_{50} = 溪床床砂之中值粒徑 (m)。

王志豪 (2008) 透過現地調查固床工下游淘刷坑所獲得的實測資料，研究花蓮縣土石流災害防砂設施之功效，並將實測淘刷坑 2 區、22 組數據進行無因次化後，找出固床工下游淘刷坑之最大淘刷深度及最大淘刷長度與臨界比能的比例迴歸方程式，式中的參數乃沿用 Gaudio et al. (2000) 的淘刷坑定義：

$$\text{最大淘刷深度：} \frac{y_s}{H_s} = 0.318 + 2.314 \left(\frac{a_1}{H_s} \right) - 0.15 \left(\frac{a_1}{\Delta \cdot D_{50}} \right) \quad [15]$$

$$\text{最大淘刷長度} : \frac{l_s}{H_s} = 1.268 - 5.99 \left(\frac{a_l}{H_s} \right) + 0.33 \left(\frac{a_l}{\Delta \cdot D_{50}} \right) \quad [16]$$

Marion et al. (2004) 探討固床工間距及渠床床砂粒徑對於固床工下游局部淘刷深度的影響，進而推導出最大淘刷深度 (y_s) 與臨界比能 (H_s) 比例的關係式如下：

$$\frac{y_s}{H_s} = 2.7 \left(\frac{a_l}{H_s} \right)^{0.43} SI^{-0.19} \left(1 - e^{-0.14 \frac{L}{H_s}} \right) \quad [17]$$

其中，

$$SI = \frac{1}{2} \left(\frac{D_{84}}{D_{50}} + \frac{D_{50}}{D_{16}} \right) \quad [18]$$

而式中， q = 單寬流量、 q_s = 單寬土砂流量、 h_u = 正規水深、 D_{50} = 床質中值粒徑、 a_l = 型態落差 = $(S_o - S_{eq})L$ ； S_o = 原設計坡降、 S_{eq} = 平衡輸砂坡降、 ρ = 流體密度、 ρ_s = 土砂密度、 D_{84} = 累積通過 84% 之床質代表粒徑 (m)、 D_{50} = 累積通過 50% 之床質代表粒徑 (m)、 D_{16} = 累積通過 16% 之床質代表粒徑 (m)。

Espa and Sibilla (2006) 利用水工模型試驗探討尾水 (tail water) 深度對潛堰 (submerged weir) 下游渠床平衡淘刷 (equilibrium scour) 的影響。研究結果發現，水流越過潛堰之後，其入潛射流 (submerged jet) 對於渠床淘刷的影響確實隨著尾水的深度而改變，且為水流密度福祿數的函數。試驗的結果並與 Schoklitsch 所提出的最大淘刷深度公式及 Shalash 的最大淘刷深度公式相比較 (Breusers and Raudkivi,

1991)。結果發現，Schoklitsch 公式所估算的最大淘刷深度與水工試驗結果差異較大，應該是與兩者的試驗設計差異有關。雖然 Shalash 所推估的最大淘刷深度優於 Schoklitsch，但部分的推估結果仍無法解釋床面射流 (bed-surface jet) 所產生的渠床淘刷現象。

Pagliara and Palermo (2006) 利用水工試驗探討「漿砌塊石緩降洩槽式固床工」下游的局部淘刷現象，試驗中所採用的緩降洩槽式固床工包含「緊密漿砌塊石式」及「部分漿砌通透式」，並嘗試在漿砌塊石緩降洩槽式固床工的下游增設拋石保護工。研究結果發現，於漿砌塊石緩降洩槽式固床工下游適當地點增設拋石的作法，對於固床工下游渠床的淘刷具有抑制的效果，主要是因為增設的拋石保護工提供了類似尾檻的功能，於固床工的下游營造出一個迴水水墊的環境。但 Pagliara and Palermo 不建議在漿砌塊石緩降洩槽式固床工下游立即增設拋石，倘若立即增設，則隨著渠床坡度的增加，反而會產生另一次的溢流水躍。

Tregnaghi et al. (2006) 探討上游加砂對於固床工下游局部淘刷的影響，並鎖定陡坡降條件進行試驗。試驗渠槽坡降包含 4.2 %、5.0 %、6.2 % 及 7.4 %，入流流量採用 18 L/s、22 L/s 及 26 L/s，上游加砂量則採用 10.7 g/s、21.3 g/s 及 26.0 g/s，以及不額外加砂的控制組。研究結果發現，上游若採用額外加砂，如同預期，固床工下游的淘刷規

模會隨著上游加砂量的增加而減小，但局部淘刷的發展速率並不會因為上游額外加砂有所影響。因此，Tregnaghi et al. 指出若要探討固床工下游的局部淘刷現象，採用清水流試驗是可以被信賴的。

Wu et al. (2014)、吳嘉俊等 (2016) 利用水工縮尺試驗，探討固床工下游設置拋石對固床工趾部之渠床局部淘刷的控制效益。研究結果指出，固床工趾部拋石確實可以降低渠床局部淘刷的規模，但卻無法完全消除局部淘刷的發生。當拋石保護工以巨粒拋石構成時，由於巨粒拋石所營造較高的高程落差及較大的拋石間隙，使得流經的水流容易從間隙流過，造成渠床淘刷，且淘刷坑發生的位置較容易在拋石末端發生。拋石保護工的長度也會影響其對於固床工趾部渠床局部淘刷的控制效益，當拋石長度過短時，溢流水的投射路徑若是落於拋石保護工的末端，則局部淘刷的控制效益不佳；反觀較長的拋石保護工，除了能消弭溢水流的能量外，亦能營造並維持拋石粒徑所產出的水流境況 (flow regime)，有利於局部淘刷現象的控制。

第三節 橫向構造物改良之相關研究

有鑑於經過整治後之野溪溪流型態過於單調，林瑞仁 (2003)、Wu et al. (2004) 利用水工模型試驗，測試於傳統式固床工結構體上開設

單一開口，並調整相鄰兩固床工開口開設位置的偏距 (offset)，以營造出侷限環境 (confined environment) 下蜿蜒槽線 (sinuous thalweg) 的可行性。研究中以蜿蜒指數 (sinuosity index; S_n) 做為蜿蜒槽線的評估指標，並提出以下公式：

$$S_n = 1.3099 \frac{D_{50}^{0.0085} Q^{0.0077}}{B^{0.0077} S^{0.0218} h^{0.0192}} \left(\frac{\Delta e}{Li} \right)^{0.0894} \quad [19]$$

式中， S_n = 蜿蜒槽線的蜿蜒指數、 D_{50} = 床砂中值粒徑 (m)、 Q = 整治段的設計流量 (cms)、 B = 整治段溪幅寬 (m)、 S = 水力坡降、 h = 設計正規水深 (m)、 Δe = 相鄰兩帶工之開口偏距 (m)、 Li = 相鄰兩帶工之間距 (m)。該公式可適用於渠床平均坡度 2~6%、設計流量 8.84 ~ 42.43 cms、床砂中值粒徑 25.25 ~ 68.50 mm 的整治溪段中。

林原巧 (2005) 透過室內水工模型試驗，探討於傳統式固床工結構體上開設不同數量開口對直線段溪床床型 (bedform) 變化的影響，並以 Shannon 歧異度指數 (Shanon Diversity Index, SDI) 量化溪床床型的高程變化。同時，利用達西阻力係數 (Darcy friction coefficient) 量化床型形狀糙度 (form roughness) 的變化。研究結果指出，開口式固床工較傳統固床工能提供較多樣的床型變化，使得溪床床型歧異度由傳統式固床工的 0.261 最高可提升至單開口固床工的 2.093。研究亦發現，開口式固床工的匯流聚能能力會隨著固床工阻水比 (flow obstruction ratio) 的降低；亦即，開口數量的減少，而逐漸提昇，因

此，單開口固床工趾部的渠床最大淘刷深度約為傳統式固床工的一倍，對於固床工基礎與固床工本體結構具有潛在的威脅。當渠床坡降較緩時，建議可減少開口數量，以增加水流束縮，提昇床型變化；但是當渠床坡降較陡時，應選擇高阻水比的多開口式固床工，以達到分散水流、抑制淘刷深度，並兼具維持生態廊道貫通與溪床床型變化多樣的目的 (Wu and Lin, 2006)。

陳沛霖 (2006) 利用水工縮尺模型試驗，探討開口式圓弧型固床工應用於野溪整治的可行性，試驗及分析項目包含：水流特性、水流流速、床型沖淤變化、床型歧異度、達西阻力係數等。研究的結果指出，當圓弧型固床工結構體上的開口數量少時，其所產生的床型歧異度較開口數量多時為大，可營造出多變的床型型態，但必須注意因為水流匯集所產生的淘刷對結構物的負面影響。同時，研究結果亦指出，開口式圓弧型固床工較開口式直線型固床工更能增加床型歧異度，預期對於水棲生態環境較有貢獻。

何國勇 (2007) 針對開口式近直線之弧型固床工進行研究，近直線之弧形固床工的軸向曲率設計，乃介於林原巧 (2005) 的直線型傳統固床工 (構造物的軸向曲率半徑 = ∞) 與陳沛霖 (2006) 的圓弧型固床工 (構造物的軸向曲率半徑 = $\frac{1}{2}$ 溪幅幅寬) 之間；亦即，構造物的軸向曲率半徑等於 0.6 倍的溪幅幅寬。研究結果發現，固床工開

口數量的增加可以分散水流對固床工趾部溪床的衝擊，使得淘刷坑的範圍縮小、深度變淺；但是當流量增加、水流自固床工頂溢流而下時，固床工開口數量的增加，對於固床工下游渠床淘刷變化的影響較不明顯。除此之外，開口式近直線之弧形固床工所產生溪床床型歧異度普遍大於開口式圓弧型固床工、開口式直線型固床工，甚至大於傳統式固床工。

何國勇 (2007) 之研究建議，當溪流坡降大、屬於高變動溪床時，可以採用開口式近直線的弧形固床工，以降低水流對溪床的衝擊，並兼具多樣床型的營造與生態廊道的維持。當溪流坡降緩、屬於低變動溪床時，可減少開口數量，以增加水流束縮、提升溪床床型變化及水流雕塑能力；但是，開口少的固床工容易造成水流集中淘刷，應注意構造物基礎的安全。

第四節 生態水力學 (Ecohydraulics) 之相關研究

近半世紀以來，人類行為對於河川及濱溪生態系統的衝擊已逐漸在國際間獲得重視，因此，國際間開始自覺改變目前溪流整治思維確實有其必要性，而具體的作法多以近自然的方法提供蜿蜒的溪流、改變河道的幾何形狀、提高溪床型態的多樣性、營造及維持棲地環境等

(Downs and Thorne, 1998; Bockelmann et al., 2004) 手段為之。

Kemp et al. (2000) 研究發現，溪流的水力條件可以藉由溪床型態的改變而達到棲地異質性的最大化，同時可增加生態的多樣性。Shamloo et al. (2001) 則發現溪流的福祿數以及溪床剪應力 (bed shear stress) 為主要影響溪流水力條件的因子，溪床剪應力控制了溪床的沖刷，進而改變溪床型態與有機物的族群。

湍瀨—深潭 (run-pool) 或是階段—深潭 (step-pool) 構造於溪流生態環境之維持工作上扮演著重要的角色，這些微型結構 (micro structures) 造就了溪流流場的多樣性。深潭是溪流段中地形較為低漥的地區，潭內的流速較為緩慢且床質粒徑偏細；湍瀨則是溪流段中地形較為突出底床的區段，該區段流速較快，床直粒徑偏粗。湍瀨—深潭的組合隨著溪床坡降的增加，河川功率 (stream power) 隨之增加，而逐漸轉變成為階段—深潭組合。湍瀨內的平均溪床床質粒徑約為平均床質粒徑的 1.19 倍 (Hey and Thorne, 1986)，至於湍瀨間的間距約為溪流幅寬的 5~7 倍 (Leopold et al., 1964)。Hey and Thorne (1986) 根據礫石床質河道進行調查，發現湍瀨間的間距約為河幅寬的 6.31 倍，與 Yalin (1972) 所提出紊流 (turbulent flow) 條件下湍瀨間距為河幅 2π 倍的結果相當接近。

當豐水期結束、溪流水位逐漸下降時，湍瀨首先承受水位的影響，

此時，湍瀨的功能形同一寬頂堰 (broad-crest weir)，協助將豐水期結束所殘留的溪水蓄積於上游緊鄰的深潭中。深潭隨著水位的持續降低而最終成為孤立的水體，也成為濱溪而居之生態物種的重要棲地。

當豐水期來臨，深潭中的水位與流速開始發生劇烈變化，深潭中的溪床床砂迅速產生自然篩分現象，篩分的結果讓部分床砂得以被運移離開深潭而進入下游的湍瀨區段，二次篩分運送 (selective transport) 再次在湍瀨段發生，使得湍瀨段的床質粒徑逐漸粗化。粗化的床質與湍急的水流除了營造出多孔隙的湍瀨表面外，更增加了水中溶氧量，成為水棲生物產卵繁衍的重要場所。

Gordon et al. (1992) 針對溪流生態復育提出主動與被動式兩種；其中，被動式的溪流生態復育是以濱岸植生復育及適時的物種引進為主要手段，而主動式的溪流生態復育則是以河道改良及蜿蜒重建為首要工作；其中，河道改良的重點應著重於深潭、湍瀨、中途島、次河道的建立，而蜿蜒的重建則是強化深潭—湍瀨的發生，以營造出多樣性的流場，達到表面粗糙化的目標。

相較於「地景 (landscape)」，所謂「河景 (riverscape)」的觀念可以追溯到 1960 年代由 Leopold and Marchand (1968) 首先提出此觀念，用以描述自然河川的地文、生物與美學特徵。Fausch et al., 2002、Poole, 2002、Ward et al., 2002 及 Wiens, 2002 開始將「河景 (riverscape)」的

觀念應用於河道內物質、能量、棲地結構以及河道內不連續區間的描述上，這些微型結構影響著生物族群的遷徙與河川生態。

Wiens (2002) 認為，地形生態理論 (landscape ecology theory) 可以協助吾人對於河景零星區塊的瞭解，其中包含：(1).零星區塊的組成與差異、(2).零星區塊對於水流的影響、(3).零星區塊的連結、(4).零星區塊對於生物體的影響等。河景零星區塊乃是指河道內具備相似物理與生物特質的區域 (Pringle et al., 1988)，而零星區塊的大小，就濱溪生物體而言，則是由生物體的大小與其遷徙需求而定。

第三章 試驗材料與方法

第一節 試驗材料

本研究乃是利用國立屏東科技大學水土保持系陡坡水工實驗室的試驗渠槽進行 1:50 比例之縮尺模型 (scaled-model) 實驗，試驗渠槽全長 4.0 m、寬 0.9 m、深 0.3 m，渠槽最大可調坡度為 11%。試驗渠槽內配有一組不銹鋼材質護岸，護岸岸坡斜率 (V:H) 為 1:0.3，以形成一梯形通水斷面。

傳統式固床工模型是以防水膠合板切割而成，其厚度為 1.5 cm、寬度為 30 cm、高度為 15 cm。固床工模型的安裝，乃是以矽膠緊密將固床工模型黏貼於不銹鋼護岸兩側及試驗渠槽底部，以形成系列固床工群。之所以將固床工模型黏貼至試驗渠槽底部，一方面是方便試驗前的填砂過程容易夯實；二方面，既使如何夯實，也無法夯實到極高的密度。倘若填砂夯實不足，則試驗期間越過固床工的投潭水較容易淘刷渠床床砂，以至於淘刷坑的規模及形狀易受影響。為使潛伏於渠床填砂面以下的水流體得以貫通，形同現場的滲流現象，本研究於固床工模型面板 1/3 高度處均勻鑽設直徑 3.2 mm 的洩水孔一排，孔距為 2 cm。

相鄰兩固床工的間距過短，則將使溪流嚴重的區間化；間距過長則固床工趾部的局部淘刷現象將嚴重到危及固床工的基礎，因此，本

研究選定 Wu et al. (2002) 所建議的 10 m 間距；若依 1:50 比例縮尺計算，則相當於固床工縮尺模型試驗 20 cm 的間距。

固床工模型完成安裝之後，即可進行填砂工作。填砂之前，先於固床工模型頂緣與渠床砂面之間保留 1 cm 的高程落差，其目的在模擬現場固床工頂緣與其下游溪床之間的 0.5 m 落差。試驗渠槽與相關附屬設施，以及系列固床工群之配置，如圖 4 所示；圖中的試驗段代表試驗階段量測水面、渠床砂面高程以及試驗結束後量測最終渠床砂面高程的區間。

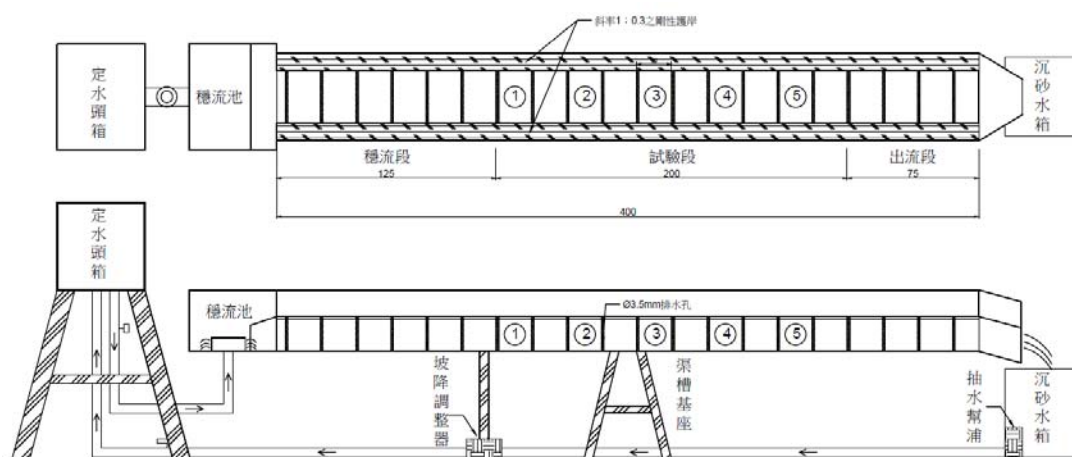


圖 4 試驗渠槽與系列固床工模型配置示意圖

本研究之所以採用系列固床工群的配置，乃是利用系列固床工群以及間隔量測的方式取代重複試驗。通常進行動床 (mobile bed) 水工模型試驗時，試驗設計上可採「上游加砂 (upstream sediment feed)」或所謂的「清水流」 (clear-flow without sediment feed) 設計；其中，

「上游加砂設計」是於試驗當中不斷地在試驗渠槽上游以加砂器對試驗渠槽進行加砂，而「清水流設計」乃是採用上游不加砂的方式，以獲知動床經由水力淘刷 (hydraulic scour) 後的最惡劣狀態。

為瞭解固床工趾部的最大淘刷狀況；包含(1).最大淘刷深度、(2).最大淘刷深度發生位置與固床工面板之間的距離、(3).固床工趾部淘刷的平均長度，故本研究採用所謂的「清水流」試驗。與其說是「清水流」試驗，不如稱之為「似清水流 (pseudo clear-flow without sediment feed)」試驗，其原因是因為水工試驗渠槽的參數量測區間（如圖 4 中的①、②、③、④、⑤）之間都保留一個區間不予量測，保留間隔區間的理由是希望試驗期間當中保留間隔區間所產生的土砂成為緊鄰之固床工區間的土砂補充來源。由於渠床床砂的淘刷及土砂的運移屬於動態行為，因此，必須等到渠槽內各個固床工區間的淘刷達到穩定之後，才開始進行試驗參數的量測。

水工試驗所採用流量的選取，乃是依據：(1).實驗室既有幫浦所能提供的流量範圍、(2).動床床砂於試驗渠槽坡降下得以達到起動運動 (incipient motion) 的臨界流量，以及 (3).於最大流量及最陡渠槽坡降條件下，試驗渠槽的動床不至於被淘刷至渠槽底部等原則，進行流量的篩選與調配。

本研究採用三種混和粒徑的床砂，其平均代表粒徑 (D_{50}) 分別為

0.85 mm、1.05 mm、1.45 mm，各床砂的粒徑分佈曲線如圖 5 所示。

床砂粒徑的選取，乃是依據試驗流量、渠槽坡降，再參考席爾茲圖 (Shields' diagram) (Shields, 1936) 的土砂移動性 (sediment mobility) 與土砂顆粒雷諾數 (particle Reynolds Number) 進行篩選。

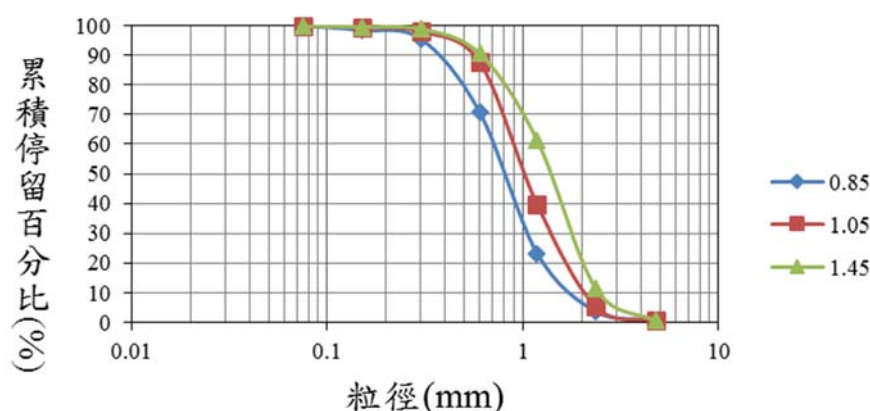


圖 5 試驗床砂之粒徑分佈

第二節 前兩年度透水式固床工之設計緣起與構想

本研究於 105 年度完成透水式 A 型及透水式 B 型固床工的模型試驗；其中，透水式 A 型固床工通透結構的通透度為 7%、透水式 B 型通透結構的通透度為 68%。106 年度則完成透水式 C 型固床工、透水式 D 型固床工的模型設計；其中，透水式 C 型固床工通透結構的通透度為 32%、透水式 D 型通透結構的通透度為 50%。透水式固床工模型的製作，乃是將原傳統式固床工模型出露於渠床床砂面的部分

切除，再分別安裝不同通透度的通透結構。

透水式 A 型固床工通透結構的製作，乃是參考台東縣東河鄉羊橋溪及屏東縣來義鄉內社溪的 H 型鋼框內填塊石的通透結構實物進行縮尺。H 型鋼框是以 4 支一般市售的串燒鐵條穿過寬約 1 cm 的透空塑膠板的四角以形成金屬框架。經本研究水工模型試驗所採用 1:50 之比例換算後，構成金屬框架的串燒鐵條直徑恰與 50 kg 級的 H 型鋼軌相當。至於寬約 1 cm 的透空塑膠板，除用於支撐串燒鐵條以構成金屬框架外，同時模擬現場所採用的鋼筋混凝土固定座。完成後的透水式 A 型固床工，如圖 6 所示。



圖 6 透水式 A 型固床工模型

透水式 B 型固床工則是為了解決透水式 A 型固床工之通透結構

較易被上游土砂堵塞所進行的改良，採二排陣列式方型箱涵設計，其目的在於增加通透結構的通透率。箱涵模型之孔洞尺寸為 5 mm × 5 mm，相當於現地實務之孔洞尺寸 25 cm × 25 cm。透水式 B 型固床工，如圖 7 所示。



圖 7 透水式 B 型固床工模型

透水式 C 型固床工乃是將透水式 A 型進行改良，將原填充於金屬框內的塊石改為網籠結構。金屬框扮演保護網籠之目的，網籠則以金屬網構成。透水式 C 型固床工，如圖 8 所示。



圖 8 透水式 C 型固床工模型

透水式 D 型固床工乃是結合透水式 A 型及透水式 B 型固床工的特色，取透水式 B 型高通透率的陣列式方型箱涵優點，但改以單排五孔管涵陣列為之。管涵陣列之間以塊石填充，其目的在於改變陣列管涵迎水面的整齊劃一，以(1).創造較不規則的迎水面、(2).改變水流流動特性與流速，並利用塊石之間較大的通透孔隙，增加上游來砂通過的機會，藉以降低固床工的水頭高度，減少溢流水的投潭力道。透水式 D 型固床工，如圖 9 所示。



圖 9 透水式 D 型固床工模型

第三節 本年度透水式 E 型固床工之設計緣起與構想

根據前二年度水工試驗的觀察以及篩選所測試之四款透水式固床工通透結構的優缺點，本 (107) 年度進行透水式 E 型固床工通透結構的設計。前兩年度的水工試驗發現，透水式固床工通透結構的通透率確實影響固床工趾部的渠床淘刷規模，同時也控制了上游隨溪水而來的土砂於固床工迎水面的堆積，甚至控制了上游來砂阻塞通透結構的樣態。

以透水式 A 型固床工為例，雖然通透結構是仿造現場實務案例於金屬框架內填充塊石，但由於通透率僅有 7%，以致上游來砂容易在固床工的迎水面堆積。

若以透水式 B 型固床工為例，上下雙排矩形箱涵陣列初遇上游來水時，挾砂水流幾乎以射流 (jet flow) 的方式由下排陣列箱涵快速通過，之後轉為滑流 (skimming flow)，如圖 10 所示。圖 10 中的灰色突出長方形塊狀物體，代表渠床糙度或突出於渠床的粗粒徑床砂。根據本研究對於透水式 B 型固床工水工試驗的觀察，當陣列箱涵未被土砂堵塞前，通過上排陣列箱涵的水流幾乎是「騎乘」於快速由下排陣列箱涵通過的水流之上，且初期幾乎不受渠床淘刷的影響。

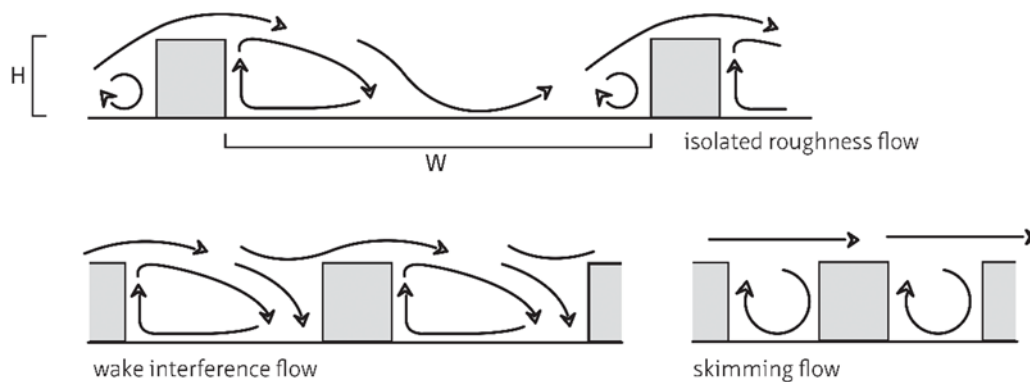


圖 10 滑流 (skimming flow) 示意圖 (Source: Urban Climate Change)

隨之而來的挾砂水流，除了堵塞下排陣列箱涵剩餘的通水空間之外，亦快速堵塞上排陣列箱涵，接著由固床工頂部溢流而過。三層不同流場境況的水流於固床工下游交會，迅速改變挾砂水流對固床工趾部渠床的衝擊，使淘刷規模縮小，此種情況仿似 福留 脩文 (Shubun Fukudome) 當年所提倡的「以水制水」概念。

透水式 B 型二排陣列箱涵的孔口尺寸雖然大於試驗用砂的最大粒徑、通透結構的通透度高達 68%，但仍會產生部分阻塞現象，且若用於現場則將增加水泥用量。因此，去 (106) 年度改變設計，以金屬框架為主體，內填柔性網籠，產生了透水式 C 型固床工，以期藉由網籠柔性結構的特性，消弭上游挾砂水流的部分力道。

透水式 C 型固床工通透結構的通透率為 32%，柔性網籠確實可以消弭上游挾砂水流的部分力道，提供類似「阻尼 (damper)」的功能，使得渠床開始出現多樣的床型變化，而固床工趾部的局部淘刷規模亦出現改善，再加上網籠柔性結構特性，無法支撐固床工迎水面堆積過大的土砂重量。但經過完整的水工試驗後發現，既使有金屬框架的保護，柔性網籠仍然容易出現變形，因此，倘若現場採用此種設計，將會增加維護上的成本。

透水式 D 型固床工通透結構的設計理念則擷取透水式 B 型的箱涵滑流概念、透水式 A 型利用填充塊石以營造金屬框內水流多變的境況，最終達到通透結構之通透率 50% 的目標。透水式 D 型固床工試驗的結果，不但保留了上述透水 C 型固床工的優點，同時更減少了固床工迎水面的土砂堆積，再一次證實「以柔克剛、以水制水」觀念。

改變通透結構迎水面的整齊劃一，除了營造多變的水流境況外，更有可能可以減少上游來砂對於通透結構的阻塞影響，是本 (107)

年度設計透水式 E 型通透結構的想法。改變迎水面整齊劃一的作法，可以由迎水斷面著手，如同透水式 D 型結構 (圖 11)，另一種作法是改變水流通過通透結構時於水深方向上的多變；亦即，讓水流在通透結構體內產生水深的變化。



圖 11 透水式 D 型固床工通透結構迎水面之結構近照

據此，透水式 E 型固床工通透結構之設計仍以金屬框架為主體，但於框架內改用兩串浮球的概念；其中一串浮球緊鄰固床工迎水面並繫於金屬框架內的上層，另一串浮球則緊鄰固床工下游面並繫於金屬框架內的下層。浮球模型則仿市售的漁業橢圓形貫穿式浮球或游泳池的橢圓形球，以達到施工便利性，甚至廢物回收再利用之目的。

透水式 E 型浮球通透結構的設計理念，是(1).讓固床工迎水面的

浮球串形成較大的通透空間，一方面希望減少上游來砂堆積，再方面希望利用浮球串的柔性特性，消弭挾砂水流的部分力道，(2).更希望利用浮球串的三度空間活動自由度，營造「以柔克剛、以水制水」的水理環境。

至於緊鄰固床工下游面並繫於金屬框架內下層浮球串的設計功能，則是期望當上游挾砂水流通過第一串浮球串之後能提供二次消能的環境，以減少水流通過固床工後的投潭作用。由於浮球通透體的設計具有某種程度的延展，希望能有助於上游來砂或堆積土砂的「自清 (self-maintenance)」。

透水式 E 型固床工通透結構模型如圖 12 所示。

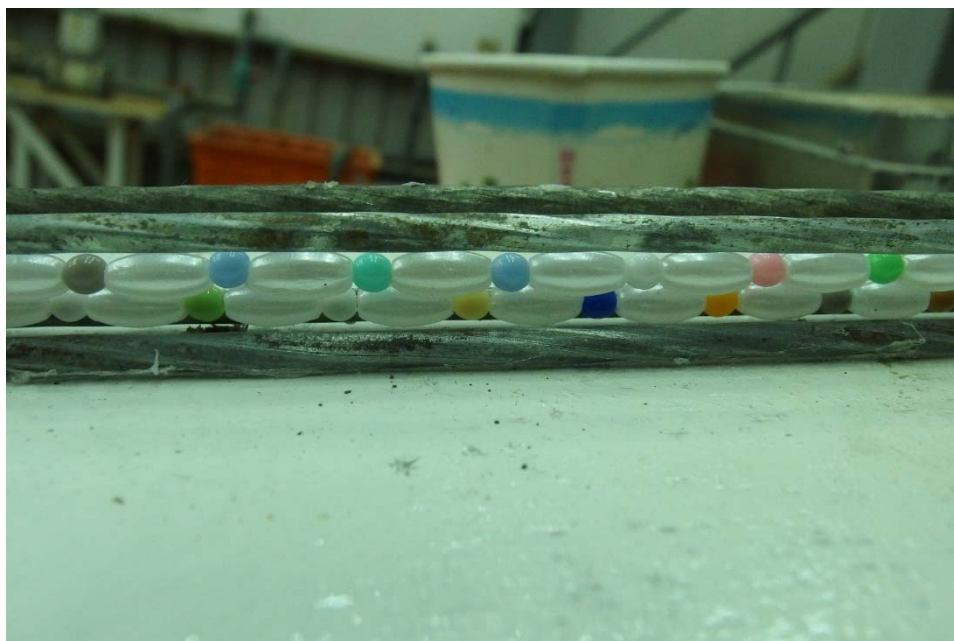


圖 12 透水式 E 型固床工通透結構之近照

第四節 水工試驗模型比例及方法

本研究的試驗模型均以幾何相似 (geometric similarity) 進行設計，模型縮尺則按照模型比尺 (model scale) 進行尺寸換算；亦即，

$$L_r = \frac{L_p}{L_m} \quad [20]$$

其中， L_r = 縮尺比例、 L_p = 實際物體(原型)長度、 L_m = 模型長度。

至於水工試驗的水力參數縮尺則採用福祿定律 (Froude Law) (毛壽彭，1987) 做為換算模型與原型之間比例關係的依據；亦即，流量比尺為：

$$Q_r = \frac{Q_p}{Q_m} = L_r^{2.5} \quad [21]$$

各項水工試驗參數及對應實物之參數如表 1 所示。

表 1 水工試驗參數

試驗參數		縮尺模型	對應現地實物
流量 (m ³ /s)		4.5×10^{-4}	7.95
		6.7×10^{-4}	11.84
		8.7×10^{-4}	15.38
坡降 (-)		0.04、0.06、0.08	
固床工間距 (m)		0.20	10.0
渠床床砂	細床砂	0.85	42.5
中值粒徑	中床砂	1.05	52.5
D ₅₀ (mm)	粗床砂	1.45	72.5

備註：縮尺比例 = 1:50

水工試驗過程中並未對渠床進行額外加砂，各固床工間距內的土砂填補及供應則是來自於上游相鄰固床工所產生的淘刷土砂，以營造出最大淘刷的情況 (Tregnaghi et al. 2006)。

為避免渠床表面及淘刷坑內的床砂於試驗過程中發生水力洗選 (hydraulic sorting)，故每次試驗完成後，須先將床砂進行人工翻攪、不足砂量的補充、渠床床砂的重新夯實、整平及鋪設，並於下一次試驗開始之前，以 $75\mu\text{m}$ 高解析雷射測距計進行渠床地形掃描，以便與試驗結束後的渠床地形掃描相互套疊，以進行固床工趾部局部淘刷特徵幾何參數與淘刷量的計算。

試驗量測之淘刷特徵幾何參數包含：(1).最大淘刷深度 (y_s)、(2).固床工趾部至最大淘刷深度間的水平距離 (λ_m)、(3).淘刷坑長度 (λ_s)，如圖 13 所示；其中， y_s 為原始渠床砂面至淘刷最深點間的垂直高程差、 λ_s 為固床工趾部至淘刷坑結束的水平距離。試驗進行期間則利用 PA1F-150S 電子式位移尺，搭配 LP-300FJ 橫向位移計與數據擷取系統 (Data Acquisition System; DAS) 量測各固床工區間內數個水面與動床砂面的斷面高程，如圖 14 所示，藉以計算各量測斷面的水深。試驗臺車及量測設備配置如圖 15 所示。

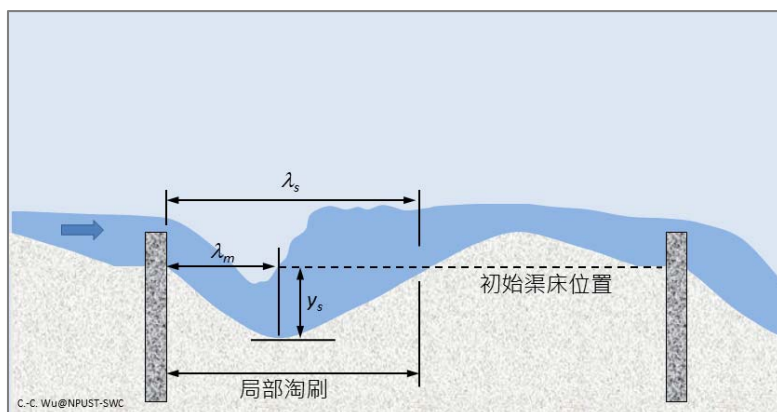


圖 13 固床工趾部局部淘刷之特徵幾何參數示意圖

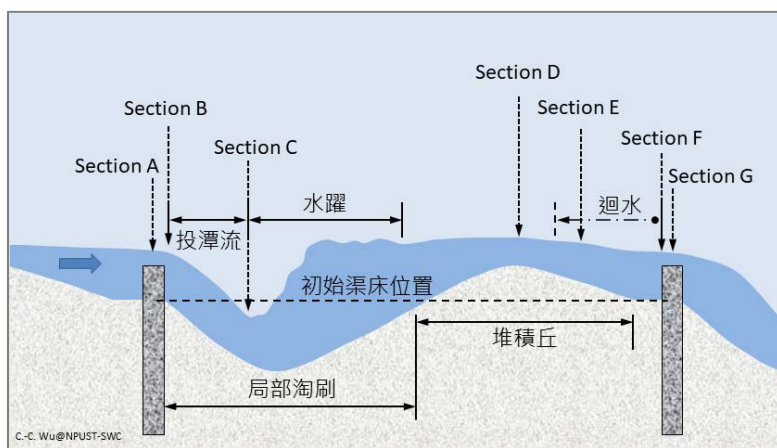


圖 14 固床工間之渠床與水面高程量測斷面位置示意圖

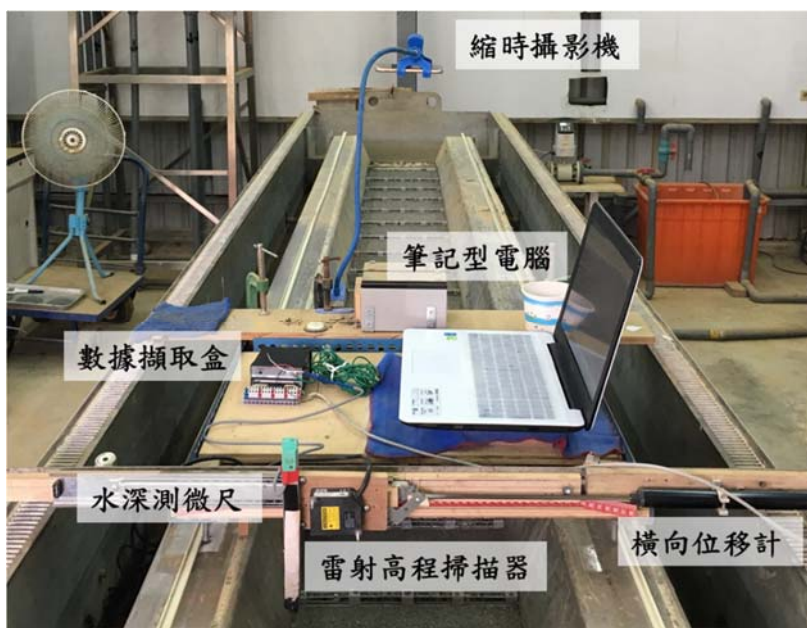


圖 15 局部淘刷及渠床 3D 掃描量測設備配置

試驗流量採用定量流，定量流的水工試驗其目標在尋求固床工；無論是傳統式或任一型式的透水式固床工；於完成設置之後水與砂之間互動所形成的動態平衡 (dynamic equilibrium)。除此之外，本研究不考慮超濃度流 (hyper-concentrated flow)，其理由是當挾砂水流的土砂含量濃度過高時，流體性質將由原先的牛頓流體 (Newtonian Fluid) 轉變成為非牛頓流體 (Non-Newtonian Fluid)。當挾砂水流的泥砂濃度持續增加時，挾砂水流的流體特性將轉變為賓漢流體 (Bingham Fluid)，亦即成為土石流 (Debris Flow)。

第五節 資料分析

為瞭解透水式固床工對固床工趾部渠床所造成局部淘刷之最大淘刷深度與淘刷範圍的影響，本研究將試驗後所量測各固床工區間內數個橫斷面的高程數據，先經過自行撰寫的 Sill-0810-Ch02-v2 程式進行過濾，以去除儀器或人為操作所造成的異常訊號。

接著將處理後的所有斷面高程資料，按照沿程位置順序，進行資料縫合，再匯入 Surfer®軟體，以克利金法 (Kriging method) 內插計算各固床工區間內的渠床高程。內插運算的結果除可用於等高線圖、剖面線圖、3D 立體圖的繪製外，也可用於淘刷規模的計算。

淘刷規模之計算，是以淘刷範圍的長度 λ_s 、最大淘刷深度 y_s 以及最大淘刷深度發生之位置 λ_m 為主要運算參數。進行淘刷規模計算時，必須先將固床工區間內的淘刷段與堆積段予以分割，本研究是以試驗前的渠床砂面高程做為分割基準。首先利用前述 Surfer® 軟體以克利金法內插計算所產製固床工區間內 1.5-mm 間距的網格地形高程 (grid torrent elevation)，再以自行撰寫的 ScourScan 程式進行試驗前後每一個網格點的高程比對分析，以獲得淘刷特徵幾何參數。當各量測區間的淘刷特徵幾何參數計算完畢後，再配合試驗照片，檢視是否出現計算結果異常，並將異常數據剔除，最後取平均值，即為該場試驗可以用於因次分析的淘刷特徵幾何參數。

本研究利用因次分析 (Dimensional Analysis) 找出影響固床工趾部局部淘刷之應變數 (dependent variables) 與影響淘刷規模之自變數 (independent variables) 間的關係，因此，利用白金漢 Π 定理 (Buckingham Π Theorem) 對所有自變與應變參數進行無因次化。無因次 Π 項的組成，除必須滿足白金漢 Π 定理之因次同質化 (dimension homogeneity) 的要求外，並於無因次化過程中不可喪失其所代表的物理意義。

經過白金漢 Π 定理處理後，本研究所採用之無因次自變數 Π 項如下：

1. 阻塞率 (blocking rate; B_r) = $[1.0 - \text{試驗後通透結構的最終通透率}]$ 。阻塞率代表試驗結束後通透結構的最終堵塞情形，並將傳統式固床工的堵塞率定義為 1.0。
2. 顆粒移動性 (particle mobility, P_m) = $\frac{\rho mg}{\rho_s m_s g}$ ；其中， ρmg 為通過固床工頂緣的流體重量、 $\rho_s m_s g$ 為構成渠床之非粘滯土砂 (non-cohesive sediment) 的重量。若將流體與土砂之間的密度比 (ρ/ρ_s) 視為定值 κ ，並考慮單位溪幅幅寬與固床工沿水流方向的單位頂寬，則顆粒移動性 P_m 可表示為 $P_m = \frac{y_h}{D_{50}}$ ，其中， y_h 為固床工頂端之單位溪幅幅寬的平均水深、 D_{50} 則為渠床土砂之平均粒徑。顆粒移動性代表土砂受到投潭水流作用時的靜態作用力比 (static force ratio)，可詮釋為水流的驅動力與泥砂抵制起動之自重力的靜態比值，比值之大小反映水流驅動土砂的難易程度。
3. 福祿數 Froude Number (Fr) = $\frac{Q/A}{\sqrt{g \cdot y_h}}$ ，用以表示重力與慣性力間的無因次參數。
4. 水力坡降 (hydraulic gradient; S)。

至於本研究用於描述淘刷坑形狀特徵的應變數 Π 項如下：

1. 淘刷坑朝上游方向的坑面斜率 (Upstream-direction Scour

$$\text{crater Slope; USS}) = \frac{y_s}{\lambda_m} ; \text{ 其中, } y_s \text{ 為固床工趾部渠床的平均}$$

最大淘刷深度、 λ_m 為最大淘刷深度發生位置與固床工面版間的水平距離。

2. 淘刷坑朝下游方向的坑面斜率 (Downstream-direction Scour

$$\text{crater Slope; DSS}) = \frac{y_s}{\lambda_s - \lambda_m} ; \text{ 其中, } \lambda_s \text{ 為固床工趾部渠床的}$$

平均淘刷長度。

3. 固床工趾部渠床的平均淘刷深長比 (Depth-Length Ratio;

$$\text{DLR}) = \frac{y_s}{\lambda_s} \text{。}$$

據此，用於描述固床工趾部渠床局部淘刷特徵的無因次公式可以

表示如下：

$$\left(\frac{y_s}{\lambda_m}\right) = f_1\left(\frac{Q/A}{\sqrt{g \cdot h}}, S, \frac{h}{D_{50}}, B_r\right) \quad [22]$$

$$\left(\frac{y_s}{\lambda_s - \lambda_m}\right) = f_2\left(\frac{Q/A}{\sqrt{g \cdot h}}, S, \frac{h}{D_{50}}, B_r\right) \quad [23]$$

$$\left(\frac{y_s}{\lambda_s}\right) = f_3\left(\frac{Q/A}{\sqrt{g \cdot h}}, S, \frac{h}{D_{50}}, B_r\right) \quad [24]$$

上式中，Q 代表試驗流量 [L³/T]、A 代表固床工頂緣的通水斷面積

$[L^2]$ 、 g 代表重力加速度 $[L/T^2]$ 、 h 代表固床工區間內(含固床工頂緣)的水深 $[L]$ 、 D_{50} 為試驗渠床的床砂粒徑 $[L]$ 、 S 為試驗渠槽坡降 $[0]$ 。

試驗流量 Q 由試驗前的流量率定獲得，率定的方法除利用體積法進行實際流量的承接計重外，更參考供水水路管線中既有的電磁式流量計讀值。通水斷面積 A ，則是由試驗期間對於各固床工區間內事先選定量測位置(如上圖 14 所示)的水面與砂面高程值相減之後計算獲得。

由於實際影響固床工趾部之局部淘刷規模的水力參數，當屬圖 14 中的 Section A 的水深 h ，因為該處水深的深淺反映了試驗流量的大小。當水流溢過固床工頂緣之瞬間所具備的能量控制了固床工趾部渠床淘刷的主導權，而渠床床砂粒徑的物理性狀則被動地抑止局部淘刷現象的發展。因此，式[22]~式[24]中的水深 h 於「結果與討論」的資料分析過程中，以固床工頂緣 (Section A) 的水深 h 代替。

第四章 結果與討論

第一節 水流流況、土砂運移與水理特性

一、傳統式固床工

傳統式固床工由於結構體頂緣高度齊平且實心不透水，導致水流會先被阻擋在固床工的迎水面，並形成迴水 (backwater)，使得流速降低。待水流蓄滿固床工後方的空間後，才能自固床工頂緣溢流，此時，水流會因為固床工頂緣與趾部渠床之間的高程落差，而以投潭的方式進入下游區段，此投潭水流進入下游渠床的角度、力道及造成渠床淘刷的位置將因入流流量、渠床坡降、床砂粒徑等條件而有所不同，如圖 16 所示。當水流溢過傳統式固床工的瞬間，本研究藉由螢光染劑的追蹤發現，水流出現短暫的加速現象，形成明渠水力學 (Open-channel Hydraulics) 之漸變流 (gradually varied flow) 中所謂的「M2 水流剖面 (flow profile)」；亦即，水流由固床工上游段的亞臨界流 (sub-critical flow)，經臨界流 (critical flow)，轉變成為超臨界流 (super-critical flow) 之過程所展現出來的水流表面剖面 (flow surface profile) (Chow, 1982)。

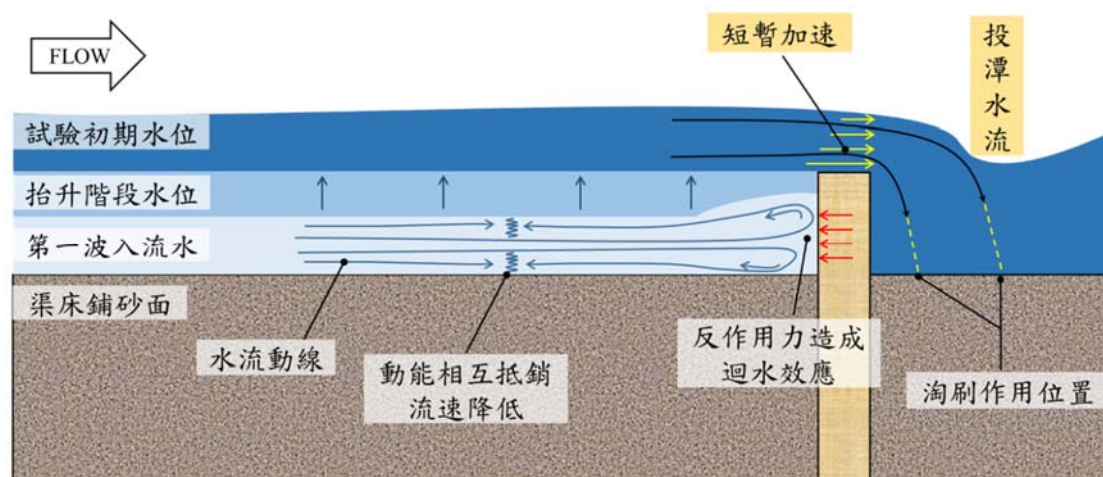


圖 16 傳統式固床工於其後方未淤滿時的水流示意圖

溢流而過的投潭水流於衝擊渠床的瞬間，會對表層床砂產生捲揚 (entrainment) 與分離 (detachment) 的作用，並迅速在投潭水的落點處產生一個淘刷坑。遭到水流衝擊而分離的土砂則暫時停留在淘刷坑內的上、下游兩側，此時，坑內水位抬升，使得淘刷的床砂更容易往下游移動。

投潭水流除了直接對固床工趾部的渠床進行淘刷外，更於投潭過程中於淘刷坑內形成兩股運行方向相反的渦流；其中一股渦流朝下游方向觸及渠床，另一股渦流則朝上游方向流動 (Bennett et al, 2000)。朝向上游方向旋轉的渦流，其主要的作用在於淘刷渠床並對朝上游方向的淘刷坑坑壁 (upstream-direction scour crater) 做功，同時也提供類似水墊 (cushion) 的功能，以消弭投潭水的衝擊。在重力及渦流的雙重作用下，朝上游方向之淘刷坑坑壁的床砂得以維持動態平衡。至於

朝下游方向運行的渦流，其能量則消耗於淘刷渠床及攜帶淘刷坑中的泥砂往坑外運移，同時保持朝下游方向之淘刷坑坑壁 (downstream-direction scour crater) 的動態平衡。

當朝下游方向旋轉的渦流離開淘刷坑之後，隨即成為渠床表面流 (surface flow) 的一部分，並挾帶被投潭水所淘刷的床砂向下游運移，至於床砂是否可以順利被運往下游而離開固床工區間，則取決於下游相鄰固床工所產生的迴水效應。

下游相鄰固床工所產生的迴水，改變了水流的輸砂容量 (sediment transport capacity)，進而使得床砂於該區段間堆積，創造了多樣的堆積丘 (deposition dune)。最後，離開淘刷坑的土砂將逐漸填補相鄰兩固床工間的囚砂空間，迴水效應的影響也因此而逐漸縮減，直到囚砂空間被完全填滿為止，此時，土砂產量與淘刷坑的幾何型態漸趨穩定而不再改變，如圖 17 所示。

堆積丘的長度與高度取決於淘刷坑的產砂量。D'Agostino (1994) 將堆積丘定性地概分為長堆積丘與短堆積丘兩類；長堆積丘通常發生於高泥砂產量之淘刷坑的下游，短堆積丘則會在低泥砂產量的淘刷坑下游形成。

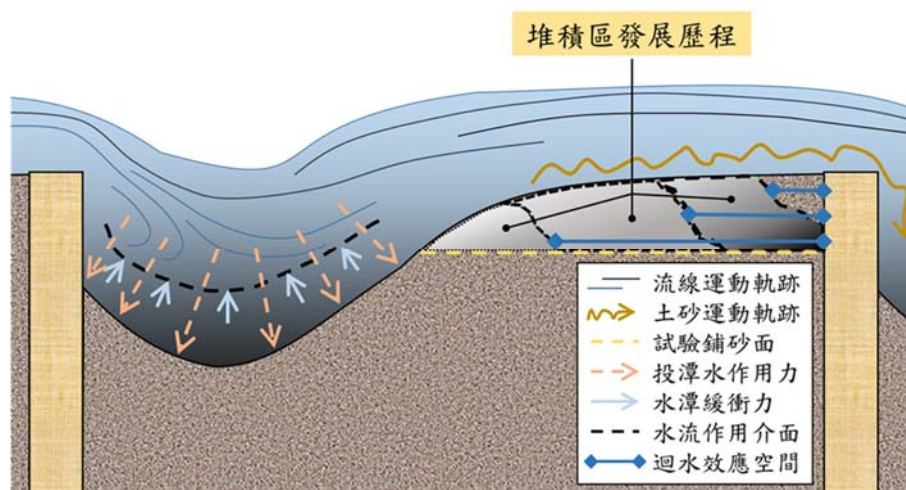


圖 17 傳統式固床工趾部渠床局部淘刷發展示意圖

本研究發現，當投潭水流與渠床坡降得以營造出高泥砂產量的淘刷坑時，淘刷坑外的堆積丘長度往往會延伸至下游相鄰的固床工，導致長堆積丘的頂面高程通常與下游相鄰固床工的頂緣齊平，使得相鄰固床工原本產生的迴水效應因此而消除。

反觀短堆積丘，其堆積的規模受限於淘刷坑的產砂量，土砂堆積長度無法到達下游相鄰固床工，而在堆積丘與下游相鄰固床工之間形成一個水深較深、流速明顯較慢的緩流區域，該緩流區域的形成，侷限了下游相鄰固床工迴水效應的傳播。

迴水效應的喪失或侷限，使得原本可以因為迴水效應向源回溯至固床工趾部以做為消弭投潭能量的功能也因此喪失，導致固床工趾部局部淘刷擴大，最終造成渠床床型單調劃一。圖 18 為傳統式系列固床工群設置下整治段的渠床床型，試驗條件為：渠床坡降 = 0.06、床

砂中值粒徑 $D_{50} = 0.85 \text{ mm}$ 、試驗流量 $= 4.5 \times 10^{-4} \text{ cms}$ 。

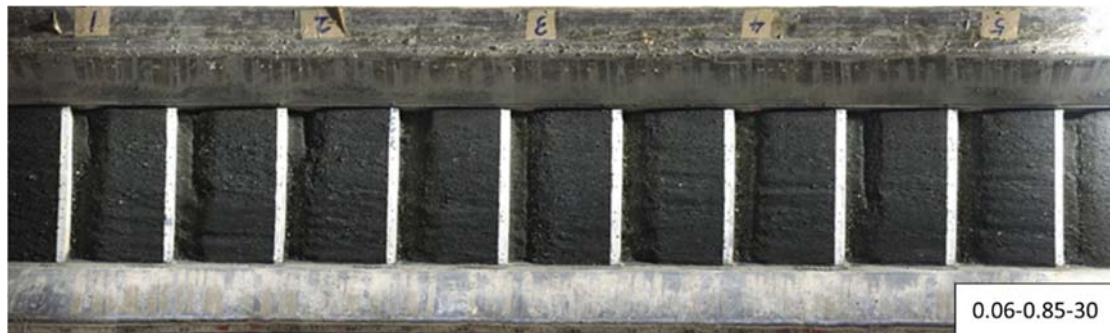


圖 18 傳統式固床工渠床床型之全貌

二、透水式 A 型固床工

透水式 A 型固床工乃是仿造台東縣東河鄉羊橋溪的現場實作案例縮尺製作，以四支一般市售的串燒鐵條穿過寬約 1 cm 的透空塑膠板的四角模擬現場鋼軌矩形格框，並在格框內以填充塊石的方式，構成一個透水的結構體。

透水式 A 型固床工通透結構格框內的透過空隙分布並不均勻，得以提供水流通過的空隙大部分集中在通透結構與固床工底版間的接觸面以及靠近通透結構的頂端，其餘的通透空隙則隨機分配於石塊之間，如圖 19 所示。

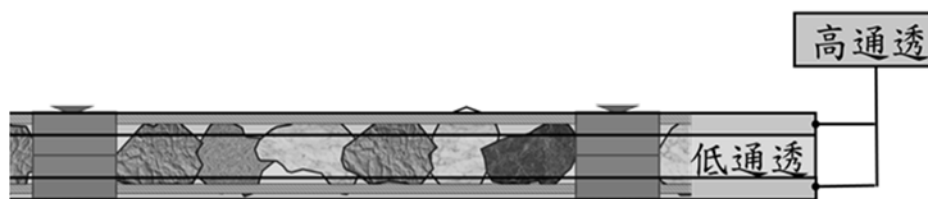


圖 19 透水式 A 型固床工通透結構體之空隙分布

當水流通過透水式 A 型固床工時，首先會有部分水流從靠近通透結構底部之填充塊石的空隙通過，隨後，暫時被遲滯在固床工後方的水流水位開始快速抬升，並從不規則排列的填充塊石間隙中鑽出、順著塊石的間隙流下，並與流過通透結構體底部的水流匯集。當水流溢淹漫過固床工時，溢淹水流才會以投潭的方式進入固床工趾部。

雖然透水式 A 型固床工通透結構的通透率僅 7%，但當上游水流初次通過時，水流均可以順利通過金屬格框內填充塊石間的空隙，使得固床工後方水位的壅高不如傳統式固床工來得快速。通過的水流，由於受到格框內填充塊石的影響，水流被迫分散、流速明顯變慢，導致淘刷規模略為縮減。

又因為透水式 A 型固床工通透結構體的頂端受到結構體內填充塊石的影響而崎嶇不一，造就了溢淹而過之投潭水流量的分布不均，直接影響下游淘刷坑的形狀。若是通透結構體頂端某處的塊石空隙較大或較為通暢，則該位置將有較大的流量通過，其下游渠床對應位置也就容易出現規模較大的淘刷坑，且土砂輸送的效率較高，進而影響

淘刷坑下游渠床的土砂堆積。反之，在較少流量通過的空隙位置將會產生較小規模的淘刷、較低的土砂產量以及規模較小的土砂堆積。如此交互影響下，常可在試驗結束後出現一些不規則的鋸齒渠床床型，如圖 20 所示。圖 20 所示的試驗條件為：渠床坡降 = 0.06、床砂中值粒徑 $D_{50} = 0.85 \text{ mm}$ 、試驗流量 = $4.5 \times 10^{-4} \text{ cms}$ 。

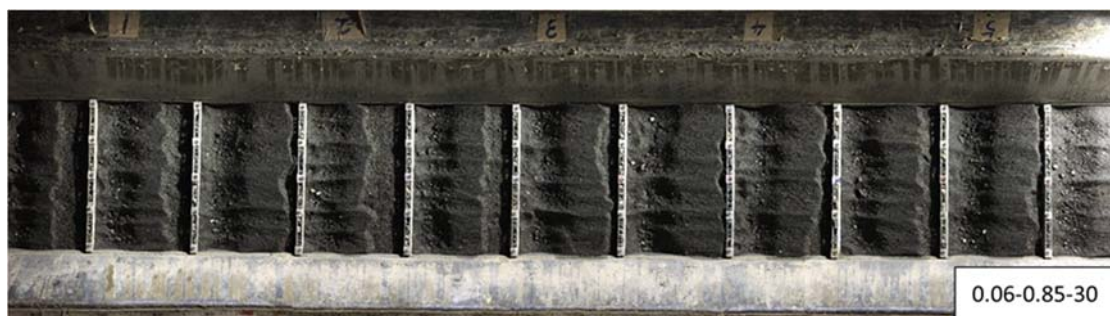


圖 20 透水式 A 型固床工渠床床型之全貌 (部分阻塞)

投潭水流在淘刷坑內的運動行為與傳統式固床工無異，但土砂運移過程則因通透結構的通透特性而有所不同。初期，透水式 A 型固床工位於通透結構體底端的空隙足以讓一些較細小的土砂顆粒通過，這些細顆粒土砂通常會停留在固床工趾部，此現象僅隨機發生在試驗初期，當底部的空隙受到粗顆粒土砂堵塞後則隨即停止。接著，土砂改從填充塊石間的空隙通過，並逐漸填滿大部分的塊石間空隙，也使得通透結構體的頂端變得平整。

隨著固床工迎水面水位的逐漸壅高、上游來砂的逐漸淤積，水流

開始以溢流方式漫過固床工，而產生投潭作用，投潭作用則隨著流量或渠床坡降的增加而逐漸恢復。最後，只要上游來砂足以將通透結構內填充塊石的空隙阻塞，投潭作用將趨近於傳統式固床工，而通透結構體頂端的崎嶇不平對於水流所造成的影響也會因此而減少，最終呈現類似於傳統式固床工較為平整的淘刷坑，如圖 21 所示。圖 21 所示的試驗條件為：渠床坡降 = 0.06、床砂中值粒徑 $D_{50} = 0.85 \text{ mm}$ 、試驗流量 = $8.7 \times 10^{-4} \text{ cms}$ 。

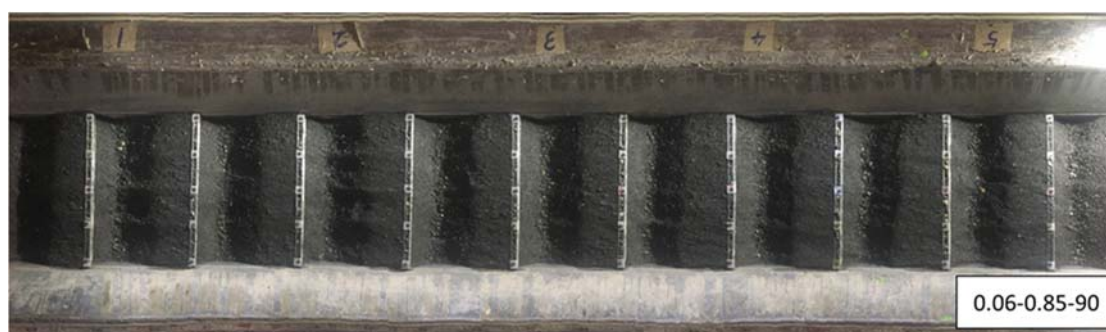


圖 21 透水式 A 型固床工渠床床型之全貌 (完全阻塞)

雖然如此，由於透水式 A 型固床工具備通透功能，使得投潭水流的分佈不會像傳統式固床工來得均勻。倘若固床工後方水位壅高程度較低而未發生溢流投潭，此時水流多由金屬格框間通過，則可以發現投潭沖擊的效果下降。

在部分通透、部分溢流投潭的交互作用之下，透水式 A 型固床工得以創造出較傳統式固床工來得多樣的渠床床型，且下游緊鄰的固床

工後方較不易產生均佈的土砂堆積區。因此，雖然透水式 A 型固床工的通透率偏低，但就固床工趾部的渠床局部淘刷而言，可以獲得削減。

三、透水式 B 型固床工

高通透率的透水式 B 型固床工通透結構，是採用二列陣列箱涵設計。由於陣列箱涵平行均一，當上游水流來到固床工時，挾砂水流可以輕易通過，使得水流無法於固床工後方停滯，以至於初期不易見到投潭水流衝擊渠床的現象。

穿越通透陣列箱涵的水流隨即對固床工趾部的渠床做工，並將土砂帶往下游。受水流攜帶的土砂大多可以順利通過下游緊鄰的陣列箱涵，僅有少部分的土砂在下游固床工迎水面處堆積，因此不容易產生迴水效應。固床工後方的水位雖然因為固床工的攔阻而有些許抬升，但抬升的幅度遠不及傳統式與透水式 A 型固床工。

由於透水式 B 型固床工的陣列箱涵內部平滑，通過水流的流速不會受到箱涵糙度影響而改變，而以近似射流方式衝出。當渠床表面床砂經由高通透且平直的陣列箱涵通透射流的攜帶到達下游緊鄰的固床工時，試驗初期可以觀察到固床工間的渠床明顯均勻下切，形成相對均一的渠床床型。通透射流隨後接觸到相對粗糙的渠床，渠床表面較大的摩擦阻力消耗掉水流的部分能量，並於固床工下游產生水躍

現象，最後在固床工的趾部產生淘刷，如圖 22 所示。

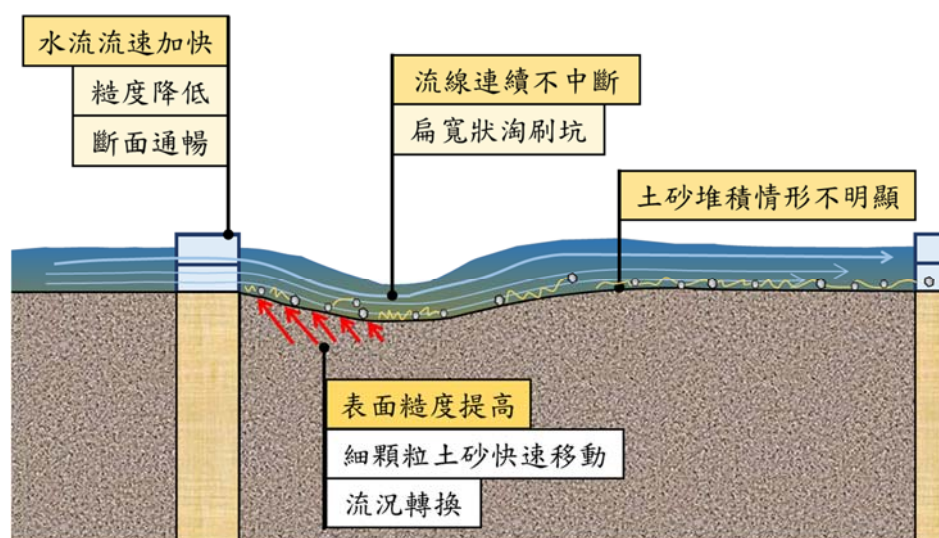


圖 22 透水式 B 型固床工於試驗初期時的水流與淘刷機制示意圖

由於透水式 B 型固床工所營造出的射流流況特性，導致試驗初期渠床表層床砂的輸送情形較為劇烈。當土砂被帶往下游後，會受到下游緊臨固床工的篩選，較粗的土砂隨機在固床工的迎水面堆積，造成固床工通透率隨著土砂的堆積而逐漸降低。同時，在固床工通透結構體頂端橫斷面上的流量也因陣列箱涵的不均勻堵塞而變得不均勻，水位隨著土砂的堆積開始逐漸抬升，也逐漸拉大水流與固床工下游渠床間的落差，最後當陣列箱涵被完全堵塞時，淘刷的形式回復到與傳統式固床工相似的投潭淘刷。

土砂對於陣列箱涵的隨機堵塞行為直接影響淘刷坑的形狀，在透水式 B 型固床工的試驗當中發現，某些區段在渠道的中心線上可以

見到較明顯的淘刷坑，其餘區段的淘刷坑則緊貼左右兩岸附近，如圖 23 所示，這兩種完全不同的渠床型態通常會在試驗區段中交錯發生。

圖 23 的試驗條件為：渠床坡降 = 0.08、床砂中值粒徑 $D_{50} = 1.45 \text{ mm}$ 、試驗流量 = $4.5 \times 10^{-4} \text{ cms}$ 。



圖 23 透水式 B 型固床工間淘刷坑交錯發展的情形

渠床床砂於透水式 B 型固床工迎水面堆積的情況隨著時間進程而逐漸累積，但並未發現土砂以全幅寬的方式全面堆積，反而是出現局部堆積的現象。土砂的局部堆積，加上透水式 B 型固床工高透水特性，使得水流得以自行尋找流路，因此，匯集的水流逐漸在固床工間形成明顯的流路，並持續攜帶土砂往下游運移，進而發展出如圖 24 所見的 V 型洩槽。



圖 24 透水式 B 型固床工間渠床淘刷之發展

當 V 型洩槽持續向上游溯源發展時，倘若固床工趾部未發生明顯淘刷，即可與通過上游緊鄰之陣列箱涵的水流流路連貫，加速固床工間的渠床淘刷發展，直到淘刷深度到達陣列箱涵底部為止。此時，穿越陣列箱涵的水流開始改變其對渠床床砂做工的型態，轉變成為傳統的投潭水淘刷。

雖然透水式 B 型固床工的通透結構體具備 68%的通透率，但不表示於固床工迎水面不會產生土砂堆積。隨著水流對床砂的選擇性淘刷與輸送 (selective scour and transport)，粗粒徑床砂逐漸向下游推移，最後在固床工的迎水面產生堆積；既使本研究所採用最粗的床砂中值粒徑僅為陣列箱涵開口尺寸的 26%。

四、透水式 C 型固床工

透水式 C 型固床工通透結構體乃以相同於透水式 A 型固床工通透結構的金屬格框方式設計，再在格框內部內襯網籠，完成後的通透結構其平均平面通透率為 32%。

當挾砂水流初次通過透水式 C 型固床工時，均可以順利通過格框內內嵌網籠的孔隙，使得通透結構後方水位的壅高現象不如傳統式固床工來得快速且流速明顯變慢，導致通透的水流無法立即對固床工趾部的渠床進行淘刷，試驗初期固床工趾部以及固床工間的渠床淘刷並不明顯。

雖然格框內嵌網籠的設計具備延長水流流動路徑長度與通過時間，以及減緩水流速度的功能，對於減緩固床工趾部渠床的局部淘刷有正面的幫助，但是由於水流流速減緩甚為明顯，使得固床工迎水面的水位容易快速壅高，水流開始以溢流的方式漫淹過固床工，而逐漸產生投潭作用，如圖 25 所示。

溢流的水流於投潭過程中一樣會形成兩股運行方向相反的渦流，此現象與傳統式及透水式 A 型固床工類似。朝向上游方向旋轉的渦流，除了維持淘刷坑朝上游方向坑壁的動態平衡外，同時也提供了類似水墊的功能，以消弭投潭水流的沖擊。朝下游方向運行渦流的能量則消耗於淘刷渠床及攜帶淘刷坑中的泥砂往坑外運移，同時保持淘刷

坑朝下游方向坑壁的動態平衡。



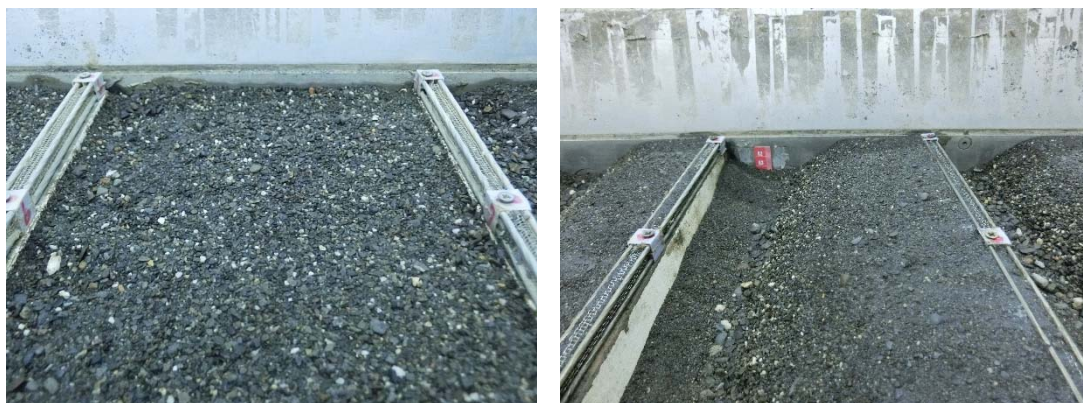
圖 25 水流溢淹漫過透水式 C 型固床工造成投潭的情形

在透水式 C 型固床工所產生的投潭水流沖擊下，固床工趾部渠床的淘刷逐漸形成，土砂逐漸向下游運移而於下游緊臨固床工的迎水面處淤積，此現象與透水式 A 型較為接近。投潭淘刷的作用隨著流量或渠床坡降的增加而逐漸增加。

本研究於試驗中利用注射針筒將螢光染料注入水流並觀察染色水流通過透水式 C 型格框內嵌網籠之通透結構體的行經路徑發現，當水流即將穿過網籠前，染色水流大致上呈現出明顯的流線；當染色水流通過網籠時，原先明顯的流線開始出現擴散。當逐漸擴散的螢光染料通過網籠後，擴散的情況更為嚴重，此時穿過網籠的水流已降至接近停滯狀態，之後隨即遭遇上方溢流水的侵入，最後融為溢流水的

一部份。因此，接下來投潭水是否能夠對固床工趾部渠床造成淘刷，而淘刷規模為何，就不再是由通透結構體決定，而是由匯流水離開固床工時具備多少剩餘能量來決定。

影響透水式 C 型固床工趾部局部淘刷規模的因子除了由匯流水的剩餘能量決定外，仍包含影響渠床床砂移動性的外在與內在因子；其中，內在因子當屬土砂粒徑，而外在因子當屬渠床坡降及相鄰兩固床工間的交互影響。就內在因子而言，較細粒徑的床砂在投潭的沖擊作用下具備較高的潛勢被起動而淘刷；反之，則較不易形成明顯的淘刷坑，圖 26(A)即為本研究所採用最緩的渠槽坡降、最粗的床質粒徑，搭配最小流量所產生的小規模淘刷、圖 26(B)為最陡的渠槽坡降、最細的床質粒徑，搭配最大流量所產生的固床工趾部淘刷情形、圖 26(C)則為透水式 C 型固床工於最陡渠槽坡降、最細床質粒徑，搭配最大流量所產生的淘刷全景。



(A). $S=0.04$ 、 $D_{50}=1.45\text{mm}$ 、 $Q=4.5 \times 10^{-4}\text{cms}$ (B). $S=0.08$ 、 $D_{50}=0.85\text{mm}$ 、 $Q=8.7 \times 10^{-4}\text{cms}$



(C). $S=0.08$ 、 $D_{50}=0.85\text{mm}$ 、 $Q=8.7 \times 10^{-4}\text{cms}$ 全景

圖 26 透水式 C 型固床工保護下渠床的淘刷結果

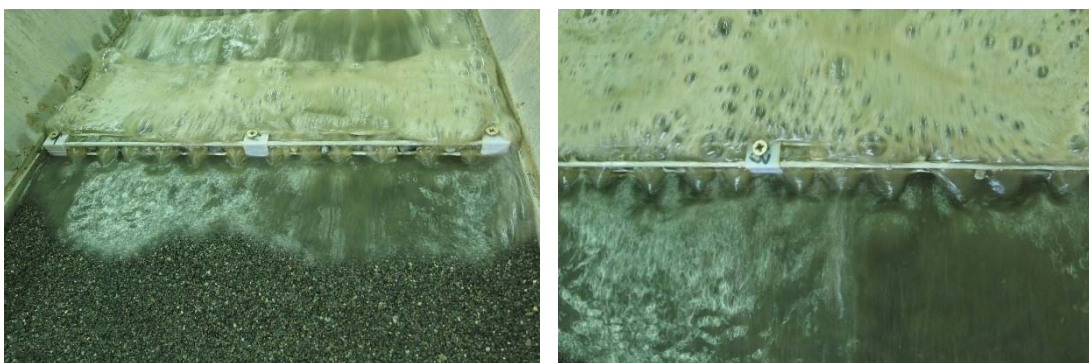
五、透水式 D 型固床工

透水式 D 型固床工的設計概念，融合了透水式 B 型陣列箱涵的優點以及透水式 A 型金屬格框內填塊石之空隙不均勻的優點，但避開透水式 C 型內嵌網籠的缺點，取而代之的是，陣列管涵於其間搭配塊石的穿插設計，提供透水式 D 型通透結構體 50%的通透率。

雖然透水式 D 型採用陣列管涵，且單一管涵的內徑較透水式 B 型單一箱涵的內徑來得小些，但仍具有高通透功能，因此當挾砂水流

初次通過透水式 D 型固床工時，如設計所預期，水流可以順利由陣列管涵及間填塊石之空隙順利通過。

圖 27(A)為水流初次通過透水式 D 型固床工時水流形成管狀流束且自由尋找通水空隙的出流情形，此現象與透水式 B 型不相同。由於管涵與管涵之間無法完全密接，使得陣列管涵比陣列箱涵多了 42.5% 的空隙面積。這多餘的空隙讓水流穿過透水式 D 型固床工後較不容易形成類似透水式 B 型的均勻射流層，取而代之的是較為紊亂且分離的管狀流束。因此，當水流初次通過透水式 D 型固床工時，對於固床工下游渠床的淘刷不似透水式 B 型來得劇烈，如圖 27(B) 所示。同時，管狀流束結構不像透水式 B 型之射流來得紮實，因此具有提供消除溢流水能量的另類水墊功能。圖 27 為挾砂水流漫淹過透水式 D 型固床工之溢流投潭及淘刷結果。



(A). 初次穿越

(B). 逐漸溢流

圖 27 水流穿過透水式 D 型固床工時的情形



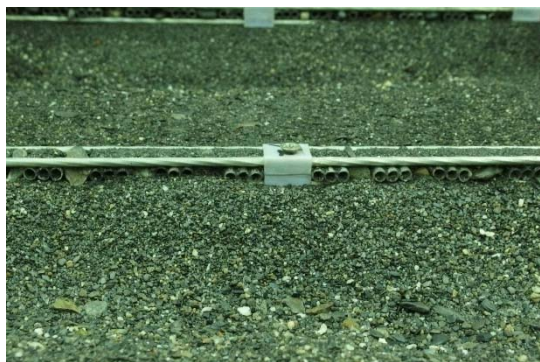
(A). 溢流投潭淘刷



(B). 投潭淘刷結果

圖 28 透水式 D 型固床工溢流投潭及淘刷結果

圖 29 為透水式 D 型固床工於最陡坡降、最大流量下，面對最細床砂粒徑時所產生的最終淘刷情形。由圖 29(B) 可看出，固床工迎水面土砂淤積的情形不如透水式 C 型來得劇烈，再加上整體通透結構的通透率比透水式 C 型高出 18%，更有助於水流與土砂的穿越。



(A). 溢流投潭淘刷



(B). 投潭淘刷結果



(C). $S=0.08$ 、 $D_{50}=0.85\text{mm}$ 、 $Q=8.7 \times 10^{-4}\text{cms}$ 全景

圖 29 透水式 D 型固床工保護下渠床的淘刷結果

六、透水式 E 型固床工

透水式 E 型固床工設計的靈感來自於過去兩年度水工試驗的觀察，尤其是透水式 C 型金屬框架內襯柔性網籠、透水式 D 型陣列管涵與其間填充塊石的「以柔克剛」概念。

透水式 E 型固床工通透結構體保留了金屬框架的外部結構，框架內則改用兩串浮球；其中一串浮球緊鄰固床工迎水面並繫於金屬框架內部上層，另一串浮球則緊鄰固床工下游面並繫於框架內的下層。浮球模型則仿市售的漁業橢圓形貫穿式浮球或游泳池的橢圓形球，以達到施工便利性，金屬框架則具有保護浮球的功能，避免浮球串直接受到上游來砂的撞擊。

目前市售的漁業用貫穿式浮球總類與材質選擇多元，圖 30 為其中的幾種選擇。漁業浮球的材質可以挑選 ABS 樹脂或是耐衝擊等級的 HIPS 聚苯乙烯樹脂，可以承受的壓力範圍為 1 ~ 140 大氣壓，至於浮球的浮力隨著選用浮球的尺寸與質量而改變，其範圍介於 0.55N ~ 765N 之間，工作水深則介於 300 m ~ 1400 m 之間，而浮球的直徑則介於 50 mm ~ 414 mm。



圖 30 市售漁業用貫穿式浮球

透水式 E 型固床工的金屬框架內繫以兩串貫穿式浮球串，當水流通過浮球串時，挾砂水流會將浮球串抬起，但抬起的幅度仍由繫繩的鬆緊以及金屬框架所侷限。浮球串的抬起，瞬間增加了通水及砂的空間，使得土砂較不容易於固床工迎水面處堆積。

本年度試驗期間之觀察發現，上游面的浮球串會隨著水流的推力而上下前後震盪。當挾砂水流遇到下游面較靠近金屬框架底部的浮球串時，該浮球串的震盪行為再次減緩通過水流的能量，其結果使得原本以溢流方式自固床工頂緣漫溢而投潭的水流不再具備分裂成為兩股反向旋轉渦流的能力。

圖 31 乃是於水工試驗期間，利用注射針筒將螢光染劑緩緩於透水式 E 型固床工後方注入所見到穿越與溢流水受浮球串震動影響下

所產生的擴散現象，該現象是本研究三年水工試驗以來所見到唯一一種因為透水式通透結構體內部構造有限度震盪所造成水流境況的改變。



圖 31 水流通過透水式 E 型固床工通透體時所產生的擴散現象

透水式 E 型固床工對於固床工趾部渠床的淘刷影響，就試驗的條件而言，出現些許改善，其中又以緩坡降的試驗條件最為明顯。本研究認為，其主要原因乃是因為金屬框架中的浮球串所致。

浮球串受到上游挾砂水流的推力而得以於金屬框架內震盪，雖然震盪幅度受限，但對於上游來砂的阻擋卻反較其他幾型透水式固床工

來得差些。圖 32 為透水式 E 型固床工於數種試驗條件下迎水面的土砂堆積情形；其中，圖 32(B)與圖 32(D)之試驗條件差異僅在於改變試驗流量；圖 32(C)與圖 32(D)的差異在於控制試驗流量不變，但改變試驗渠槽的坡降與床砂粒徑；至於圖 32(A)與圖 32(C)之差異在於控制床砂粒徑不變，但改變試驗渠槽的坡降與試驗流量。



(A). $S=0.04$ 、 $D_{50}=1.45\text{mm}$ 、 $Q=8.7 \times 10^{-4}\text{cms}$



(B). $S=0.06$ 、 $D_{50}=1.05\text{mm}$ 、 $Q=6.7 \times 10^{-4}\text{cms}$



(C). $S=0.08$ 、 $D_{50}=1.45\text{mm}$ 、 $Q=4.5 \times 10^{-4}\text{cms}$



(D). $S=0.06$ 、 $D_{50}=1.05\text{mm}$ 、 $Q=4.5 \times 10^{-4}\text{cms}$

圖 32 透水式 E 型固床工於數種試驗條件下之土砂堆積情形

由圖 32 可以發現一個現象，圖 32(C)及(D)中的固床工趾部最大淘刷深度幾乎發生在固床工下緣，而圖 32(C)及(D)的唯一共通點是相同的試驗流量；亦即為本研究所採用的最小流量，即使圖 32(C)是最

大床砂粒徑搭配最陡渠床坡降，而圖 32(D)本研究所使用的中粒徑搭配中坡降。類似的現象也出現在其他小流量的試驗當中，而這個現象也是其他類型透水式固床工試驗所未見的。

透水式固床工通透結構體一旦遭受上游來砂的阻塞，將會改變水流溢流過固床工頂緣的水理特性，進而改變其對於渠床的淘刷機制；由初期的通透水流之不均勻淘刷，逐漸改變成為溢流投潭淘刷。雖然由圖 32 可以發現透水式 E 型固床工通透結構體一樣會受到土砂的阻塞，但是阻塞的情況似乎僅發生於浮球串的表面，如圖 33 所示。



$S=0.08$ 、 $D_{50}=1.45\text{mm}$ 、 $Q=8.7 \times 10^{-4}\text{cms}$



$S=0.06$ 、 $D_{50}=1.05\text{mm}$ 、 $Q=4.5 \times 10^{-4}\text{cms}$



$S=0.08$ 、 $D_{50}=1.45\text{mm}$ 、 $Q=8.7 \times 10^{-4}\text{cms}$



$S=0.04$ 、 $D_{50}=1.05\text{mm}$ 、 $Q=8.7 \times 10^{-4}\text{cms}$

圖 33 透水式 E 型固床工通透結構體內的土砂阻塞情形

經由連續三年度水工試驗的觀察，本研究認為透水式固床工對於固床工趾部渠床的淘刷規模具有減輕的功效，透水式結構改變了水流越過及通過固床工的水理特性。各型透水式固床工對其趾部渠床淘刷的機制，整理如表 1 所示。

表 1 傳統式與透水式固床工之淘刷機制

固床工型式	通透率 (%)	淘刷機制
傳統式	0	漫淹過固床工之投潭水流主導
透 A 型： 鋼骨框架 + 內填塊石	7	塊石空隙容許水流通透，但整體結構對投潭水之投潭淘刷改善影響甚小
透 B 型： 二陣列箱涵	68	初期以水平射流方式通過通透結構，隨後改變成為滑流。不同高程之陣列箱涵營造出較複雜的水流境況，進而干擾投潭水流，使得固床工趾部渠床的淘刷規模減小
透 C 型： 鋼骨框架 + 內嵌置網籠	32	網籠主導固床工迎水面的土砂堆積與後續投潭水及局部淘刷的發展，投潭淘刷效能較傳統式弱
透 D 型： 鋼骨框架 + 陣列管涵 + 內填塊石	50	兼具陣列式箱涵水平射流及塊石填充空隙通透的雙重優點，固床工趾部渠床淘刷規模較傳統式減小，並營造優於陣列箱涵的水流境況
透 E 型： 鋼骨框架 + 浮球串	50	鋼骨框架內的浮球串具備有限度的浮動，浮動行為使浮球串產生震盪，緩和了水流的衝擊，改變了固床工迎水面的土砂堆積與後續投潭水及渠床淘刷的發展

第三節 資料分析

本研究利用白金漢 Π 定理(Buckingham Π Theorem) 對影響固床工趾部渠床淘刷形狀有關的物理參數及淘刷坑形狀特徵參數進行分析，並組合成具物理意義的無因次 Π 項。

影響固床工趾部渠床淘刷坑形狀之物理參數包含：試驗流量 Q 、重力加速度 g 、坡降 S 、固床工頂緣水深 y_h 、床砂中值粒徑 D_{50} ，以及透水式固床工通透結構之阻塞率 B_r 。用於描述淘刷坑形狀特徵的參數則有：平均最大淘刷深度 y_s 、平均淘刷範圍 λ_s 、最大淘刷深度所在位置與固床工之間的距離 λ_m (圖 34)。

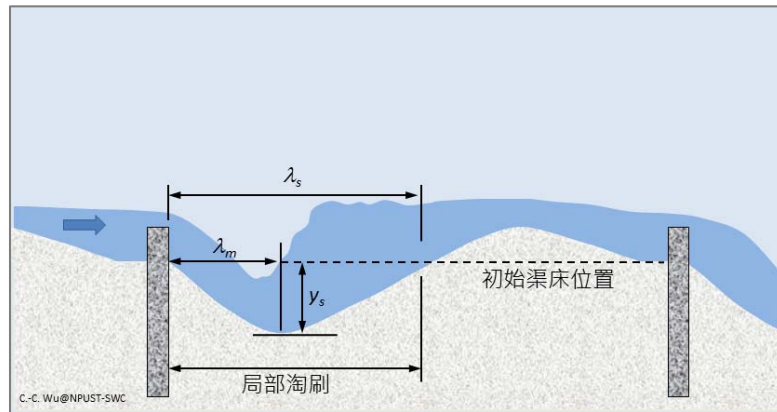


圖 34 描述固床工趾部局部淘刷之特徵參數

據此，固床工趾部渠床局部淘刷特徵的無因次公式可以表示如下：

$$\left(\frac{y_s}{\lambda_m}\right) = f_1\left(\frac{Q/A}{\sqrt{g \cdot h}}, S, \frac{h}{D_{50}}, B_r\right)$$

$$\left(\frac{y_s}{\lambda_s - \lambda_m}\right) = f_2\left(\frac{Q/A}{\sqrt{g \cdot h}}, S, \frac{h}{D_{50}}, B_r\right)$$

$$\left(\frac{y_s}{\lambda_s}\right) = f_3\left(\frac{Q/A}{\sqrt{g \cdot h}}, S, \frac{h}{D_{50}}, B_r\right)$$

其中， y_s/λ_m 用於描述淘刷坑朝上游方向之坑壁斜率 USS、 $y_s/(\lambda_s - \lambda_m)$ 用於描述淘刷坑朝下游方向之坑壁斜率 DSS、 y_s/λ_s 則用於描述淘刷坑之深長比 DLR。影響淘刷坑的無因次物理參數則包含福祿數 $F_r = \frac{Q/A}{\sqrt{g \cdot h}}$ 、渠床坡降 S 、顆粒移動性 $P_m = \frac{h}{D_{50}}$ ，以及透水式固床工通透結構之最終阻塞率 B_r 。

檢討過去兩年度及今年度的水工試驗資料與試驗觀察所見，本研究認為上三式中代表透水式固床工通透結構體之最終阻塞率的 B_r 項並不理想，其理由如下：

(1). 通透結構體的阻塞率隨著時間的進行而逐漸改變，因此並非一個穩態參數。

(2). 通透結構體的阻塞率受到上游來砂的粒徑影響，而來砂粒徑大小對於通透結構體的阻塞影響並非遵循特定的規律。

(3). 通透結構體的內部結構組成，除了透水式 B 型、透水式 D 型具有通透孔道尺寸固定的陣列箱涵、管涵之外，其餘的透水式固床工通透結構體內部填充物件或多或少具備柔性特質；例如透水式 C

型的網籠、透水式 E 型可自行發生有限度震盪的浮球串。

因此，本年度重新調整資料分析，將阻塞率 B_r 項自上三式中刪除。更新後固床工趾部渠床局部淘刷的無因次公式可以表示如下：

$$\left(\frac{y_s}{\lambda_m}, \frac{y_s}{\lambda_s}, \frac{y_s}{\lambda_s - \lambda_m} \right) = f(F_r, S, P_m) \quad [25]$$

雖然阻塞率 B_r 項自資料分析過程中刪除，但並不表示通透結構體之透水影響會因為參數的刪除而消失。主要是因為(1).雖然通透結構體或多或少會受到上游來砂的阻塞，但並非由原本通透的結構因此而轉變成完全不透水的剛性面版、(2).流經通透孔道的水流，無論流動路徑與流動過程是否順暢，仍會影響固床工趾部的水理特性，而影響的結果就反映在固床工趾部渠床淘刷、相鄰固床工之間土砂的淤積與下游相鄰固床工是否可以仍保有部分迴水效應上。

本研究採用複迴歸分析 (Multiple Regression Analysis) 以尋找影響固床工趾部渠床局部淘刷特徵應變參數與福祿數 (F_r)、渠床坡降 (S)，以及土砂顆粒移動性 (P_m)等自變參數間的最佳關係。

本研究首先將上述應變參數中出現超過一個平均值加減 3 個標準差的值 ($\mu \pm 1\sigma$) 刪除。由於實驗資料龐大，人工篩選不易，故自行撰寫 QBASIC 程式進行資料自動篩選、各次實驗各量測斷面資料縫合、自變與應變數之自然對數轉換等前置步驟後，才進行最後的複

迴歸分析。完成複迴歸分析後，再實施指數函數轉換，即獲得最終的複迴歸公式。

本年度所研發測試的透水式 E 型固床工因為具備可以有限度「自由」震盪的浮球串，使得試驗期間對於固床工頂緣水深量測較為困難，而固床工頂緣水深為計算福祿數(F_r)以及土砂顆粒移動性(P_m)的重要參數。在無法順利克服量測困難的情況下，僅能對傳統式固床工、透水式 A 型、B 型、C 型，及 D 型進行複迴歸成果的展現。

經由複迴歸分析之後，獲得以下的複迴歸方程式，如表 2 所示。

表 2 固床工趾部淘刷坑形狀特徵複迴歸方程式

固床工型式	複迴歸方程式	Adjusted R ²
傳統式	$\frac{y_s}{\lambda_m} = 0.005 \times F_r^{0.806} \times S^{-1.085} \times \left(\frac{h}{D_{50}}\right)^{0.381}$	0.077
	$\frac{y_s}{\lambda_s - \lambda_m} = 2.552 \times F_r^{0.185} \times S^{0.654} \times \left(\frac{h}{D_{50}}\right)^{0.091}$	0.785
	$\frac{y_s}{\lambda_s} = 3.829 \times F_r^{0.241} \times S^{0.918} \times \left(\frac{h}{D_{50}}\right)^{-0.026}$	0.801
透水式 A 型	$\frac{y_s}{\lambda_m} = 0.059 \times F_r^{0.195} \times S^{-0.737} \times \left(\frac{h}{D_{50}}\right)^{-0.211}$	0.234
	$\frac{y_s}{\lambda_s - \lambda_m} = 3.419 \times F_r^{0.241} \times S^{0.889} \times \left(\frac{h}{D_{50}}\right)^{0.260}$	0.726

表 3 固床工趾部淘刷坑形狀特徵複迴歸方程式 (續)

固床工型式	複迴歸方程式	Adjusted R ²
透水式 A 型	$\frac{y_s}{\lambda_s} = 8.239 \times F_r^{0.097} \times S^{1.367} \times \left(\frac{h}{D_{50}}\right)^{0.240}$	0.805
透水式 B 型	$\frac{y_s}{\lambda_m} = 0.206 \times F_r^{1.012} \times S^{0.463} \times \left(\frac{h}{D_{50}}\right)^{0.893}$	0.694
	$\frac{y_s}{\lambda_s - \lambda_m} = 5.054 \times F_r^{0.965} \times S^{1.673} \times \left(\frac{h}{D_{50}}\right)^{1.052}$	0.794
	$\frac{y_s}{\lambda_s} = 6.914 \times F_r^{0.589} \times S^{1.667} \times \left(\frac{h}{D_{50}}\right)^{0.676}$	0.837
透水式 C 型	$\frac{y_s}{\lambda_m} = 276.648 \times F_r^{-0.293} \times S^{1.868} \times \left(\frac{h}{D_{50}}\right)^{-0.270}$	0.804
	$\frac{y_s}{\lambda_s - \lambda_m} = 3.547 \times F_r^{0.281} \times S^{1.167} \times \left(\frac{h}{D_{50}}\right)^{0.600}$	0.753
	$\frac{y_s}{\lambda_s} = 7.824 \times F_r^{0.082} \times S^{1.390} \times \left(\frac{h}{D_{50}}\right)^{0.294}$	0.845
透水式 D 型	$\frac{y_s}{\lambda_m} = 1171.303 \times F_r^{1.219} \times S^{2.773} \times \left(\frac{h}{D_{50}}\right)^{0.430}$	0.281
	$\frac{y_s}{\lambda_s - \lambda_m} = 2.535 \times F_r^{0.181} \times S^{1.170} \times \left(\frac{h}{D_{50}}\right)^{0.764}$	0.821
	$\frac{y_s}{\lambda_s} = 3.618 \times F_r^{0.385} \times S^{1.342} \times \left(\frac{h}{D_{50}}\right)^{0.608}$	0.891

第四節 透水式固床工之可行性評估

就實務應用上而言，固床工趾部淘刷坑的深長比 (DLR) 對於工程設計者較具實用價值，因此本研究特將淘刷坑深長比與影響之無因次物理參數繪圖；其中包含福祿數 (Fr)、渠床之水力坡降 (S)、土砂顆粒移動性 (Pm)，其結果如圖 35～圖 37 所示。

圖 35 及圖 37 中的虛線代表資料資料分布點與水力坡降 S 之間的分布區間。圖 36 並沒有呈現資料點乃是因為資料點重疊程度較高，不容易閱讀，故以最佳趨勢線呈現。

若以圖 35 中資料點位分布落於水力坡降區間進行探討，可以發現，當水力坡降 $S=0.04$ 時，透水式 B 型固床工所產生固床工趾部渠床淘刷坑的深長比最小，而以傳統式及透水式 A 型固床工所產生趾部渠床淘刷坑的深長比最大，此結果顯示出傳統式固床工確實容易造成較大的淘刷坑深長比。

當渠床的水力坡降逐漸增加，尤其是當水力坡降上升至 0.08 以後，傳統式固床工的趾部淘刷坑深長比逐漸被其他型式的透水式固床工超越，此現象更容易於圖 36 看出。

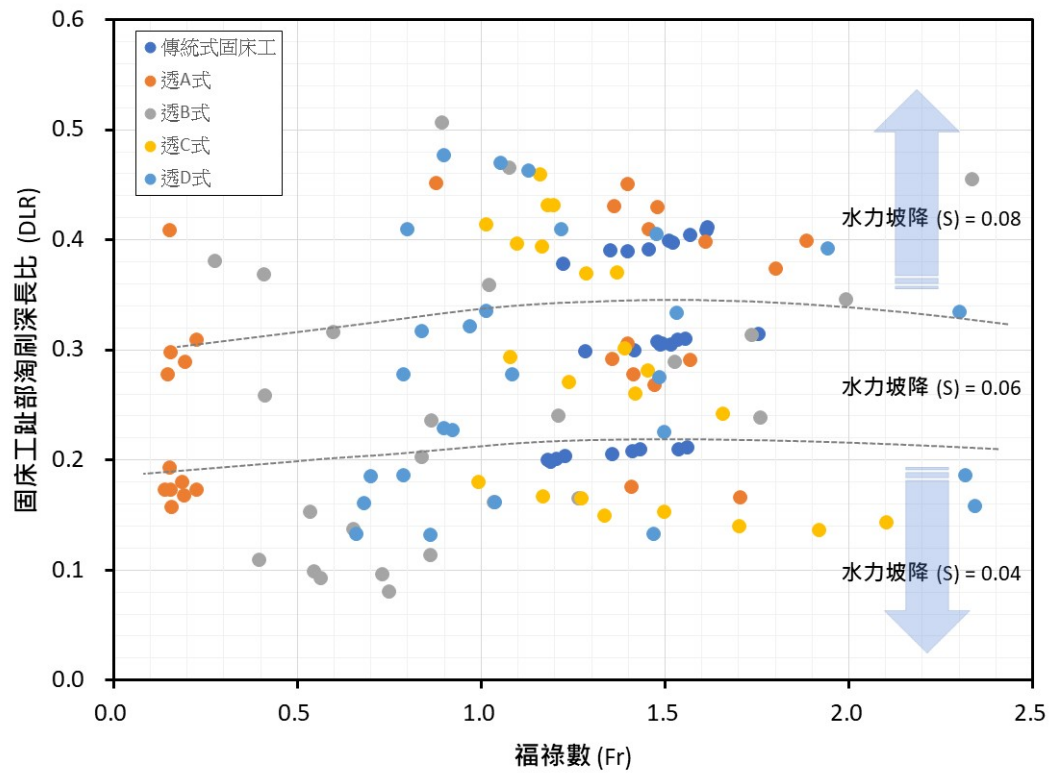


圖 35 淘刷坑深長比與福祿數關係圖

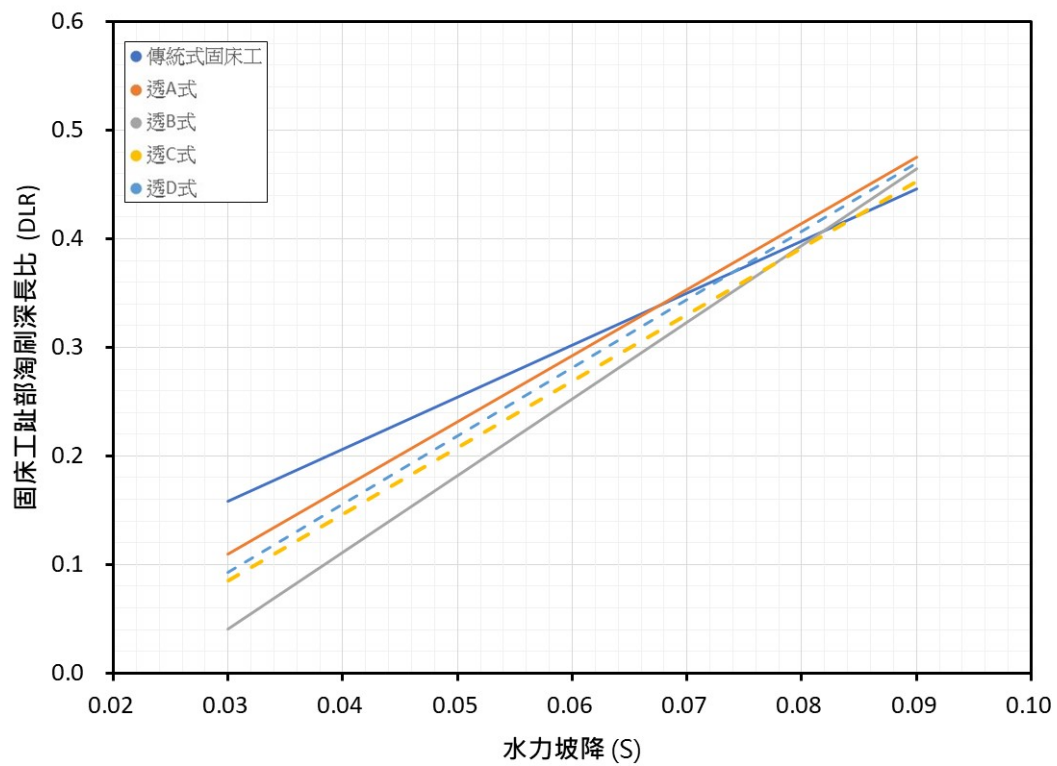


圖 36 淘刷坑深長比與水力坡降關係圖

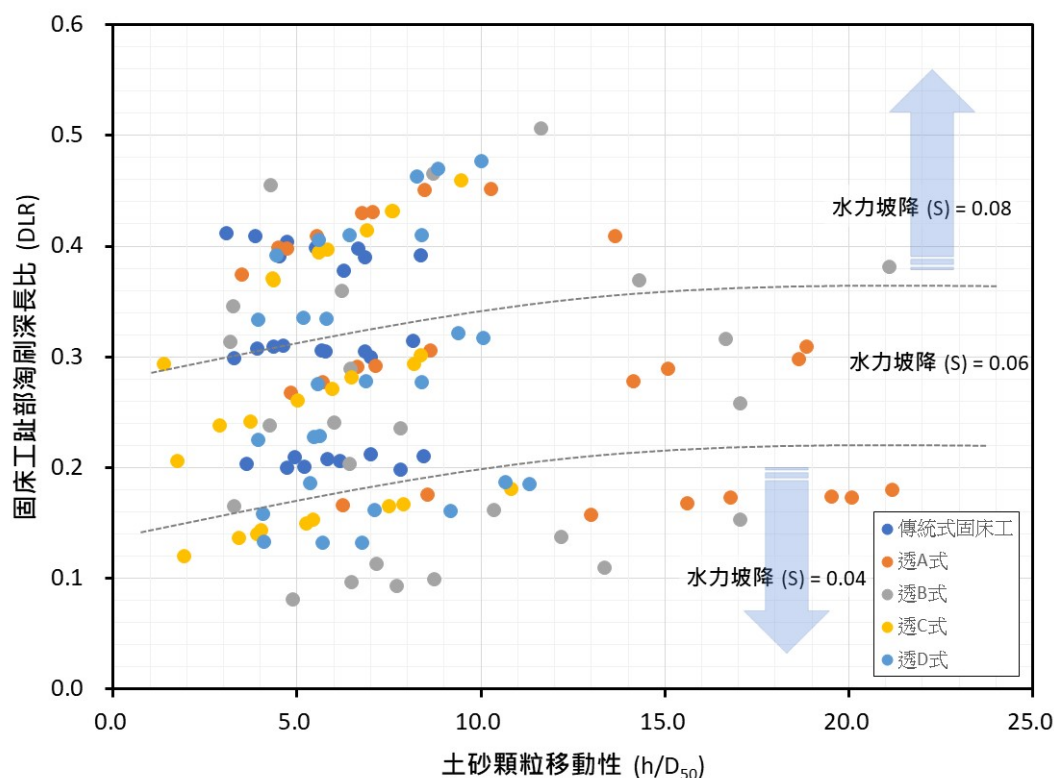


圖 37 淘刷坑深長比與土砂顆粒移動性關係圖

從圖 36 中發現，透水式固床工對於固床工趾部渠床淘刷的控制貢獻度以透水式 B 型的陣列箱涵最佳，其次依序為透水式 C 型鋼軌框內襯網籠、透水式 D 型之陣列管涵內間填充塊石、透水式 A 型鋼軌框內填充塊石；而透水式 B 型、C 型、D 型、A 型通透結構體的通透度依序為 68%、32%、50%、7%。

由以上的資料分析，本研究認為適當的通透度搭配適當的通透結構設計可以改善目前傳統式固床工所面臨的趾部渠床淘刷問題。可惜的是，今年度透水式 E 型的水深資料的量測因為通透結構內浮球串的

震盪行為，導致水深資料分析不易，無法量化透水式 E 型固床工對於本議題的貢獻。

圖 38 為傳統式與透水式 A 型固床工之工程數量計算成果。

行政院農業委員會水土保持局 工程數量計算表						
工程名稱：						
施工地點：		第1頁/共1頁				
工程項目		計算式	結果	單位	單價(元)	複價(元)
一	混凝土固床工長15m，寬1.0m，高0.6m，基礎1.5m					
1	預拌混凝土(210kg/cm ²)	2.1*1.0*15	31.50	m ³	2,140	67,410
2	普通模板	2*15	30.00	m ²	170	5,100
3	清水模板	0.6*15+1.5*15	30.00	m ²	200	6,000
4	#5鋼筋Φ16mm@25cm	60*5.8*1.56*1.06(含損耗6%)	575.45	kg	27	15,422
5	#4鋼筋Φ13mm@25cm	26*14.9*0.994*1.06(含損耗6%)	408.18	kg	27	10,939
一、混凝土固床工小計(元)						104,871
二	透水式固床工長15m，寬1.0m，高0.6m，基礎1.5m，固定座L=1m，3處					
1	預拌混凝土(210kg/cm ²)	1.0*0.6*1*3+1*1.5*15+((0.3*1.5)/2*15)	24.30	m ³	2,140	52,002
2	普通模板	1.5*15+3*1*0.6	24.30	m ²	170	4,131
3	清水模板	3*1*0.6+1.53*15+1.0*0.6*4	27.15	m ²	200	5,430
4	#5鋼筋Φ16mm@25cm	(12*5.8+24*4.6)*1.56*1.06(含損耗6%)	297.65	kg	27	7,977
5	#4鋼筋Φ13mm@25cm	(22*14.9+8*0.9*3)*0.994*1.06(含損耗6%)	368.14	kg	27	9,866
6	H型鋼(50kg/m)	8*7	56.00	m	1,110	62,141
7	卵石	0.5*0.9*0.7*12	3.78	m	706	2,669
二、透水式固床工小計(元)						144,216

圖 38 傳統式與透水式 A 型固床工之工程數量計算成果

從施工材料與經費需求觀之，鋼軌材料所需要的經費幾乎占掉總經費的 43.09%，似乎並不經濟。但是以工程改善及友善生態環境的

角度觀之，鋼軌框架型式的透水式固床工，無論內襯或內填材料為何，除了可以改變水流的流況、減少固床工趾部渠床的淘刷問題之外，又可以增加濱溪生物棲息、繁衍的空間，減少河溪因為固床工的構築而區間化。除此之外，混凝土的用量減少了 22.86%、鋼筋使用的總量減少 32.13%，對於環境的負擔而言，似乎是一個可行的工程選項。

第五章 結論與建議

傳統式固床工為治理野溪、防止溪床因為溪水的侵蝕而產生溯源的縱向淘刷的一種手段。雖然現場驗證已證實固床工存在的價值，但是仍需要面對固床工趾部渠床的局部淘刷問題、溪流區段化的問題。而固床工出露溪床的高度若過高，除了加速趾部渠床的淘刷外，更惡化了濱溪生態棲息的环境。

本研究經過三年的時間，利用水工模型縮尺試驗，從傳統式固床工的趾部渠床淘刷問題開始，測試(1).鋼軌框架內填塊石的透水式固床工、(2).陣列箱涵透水式固床工、(3).鋼軌框架內襯網籠之透水式固床工、(4).鋼軌框架內排陣列管涵並於管涵間填充塊石之透水式固床工、(5).鋼軌框架內繫漁業用浮球串的透水式固床工，目前已完成預期的目標，並證實透水式固床工的可行性。

就實務應用上而言，無論何種型式的透水式固床工，所需要的構築經費勢必高於傳統式固床工，施工上也更複雜，但是若以友善生態環境的角度觀之，野溪治理採用透水式固床工確實是可以解決上述所面對的問題。

透水式固床工的通透體結構該如何設計才最適宜？經三年水工試驗所累積的觀察與資料分析，本研究建議通透結構體的設計可以參考以下的設計原則：

1. 結構體的外部必須仍要有剛性材料做為保護，例如採用鋼軌或 H 型鋼做為框架，以抵擋挾砂水流的撞擊。
2. 結構體內部的填充材料則可以考慮柔性材料或其他材料以形成通透的孔道。

通透孔道的尺寸目前仍無法從本研究獲得具體建議，但是，本研究所採用的鋼軌框架內繫漁業用浮球串似乎是一個不錯的選擇。因為漁業浮球具有高耐撞承受能力，又可以隨著上游的挾砂水流做有限度的浮動，而浮動所產生的震盪行為緩和了挾砂水流的衝擊力道。鋼軌框架內繫漁業用浮球串之透水式固床工設計，仍有待現場試做檢驗。

3. 陣列式箱涵是一種施工便利的透水式結構，但本研究建議若要採用陣列式箱涵設計，不妨考慮上下雙排陣列。上下兩排陣列箱涵各有其對於水流流況改變的功能，具備些許「以水制水」的功能。

固床工的設計不宜將之定義為溪床坡降之調整使用；亦即不宜將之視同潛壩或落差工來進行設計。倘若固床工出露溪床的高度過高，無論何種形式的固床工，其趾部渠床的劇烈淘刷將無法避免，建議工程設計上宜特別留意，避免誤用。

圖 39～圖 41 為日本千葉縣的固床工案例，其中的設計巧思提供國人未來在設計上的參考。溪流友善生態環境的營造仍有需要吾人努力精進的空間，「以水制水、以柔克剛」也許是未來在野溪治理上必須要先行考量的重點。



圖 39 日本千葉縣透水式固床工案例一



圖 40 日本千葉縣透水式固床工案例二



圖 41 日本千葉縣透水式固床工案例三

參考文獻

1. 毛壽彭，1987，水工模型試驗，中國土木水利工程學會，臺灣，14-7～14-57。
2. 王志豪，2008，花蓮縣土石流災害防砂設施之功效調查及淘刷分析，國立屏東科技大學水土保持系碩士論文。
3. 行政院農業委員會水土保持局，2003，山地河川生態調查及棲地改善模式之建置。
4. 行政院農業委員會水土保持局，2017，水土保持手冊，工程篇：工-2-40～工-2-47。
5. 何國勇，2007，近直線弧型開口式固床工應用於野溪治理之研究，國立屏東科技大學水土保持系碩士論文。
6. 吳尚訓，2000，固床工間距對河床穩定性影響之研究，逢甲大學土木及水利工程研究所碩士論文。
7. 吳嘉俊，2001，固床工間連續帶工間距之研究(三)，89 年度水土保持及集水區經營研究計畫成果彙編，農委會林業特刊第 66 號：69-97。
8. 吳嘉俊、黃炳錡、吳雅筠，2016，拋石保護控制固床工趾部局部淘刷之研究，中華水土保持學報 47(3)：147-155。

9. 李木青，1992，防砂壩，台灣省水利局防洪工程設計講習班講義。
10. 林原巧，2005，開口式固床工應用於野溪整治之研究，國立屏東科技大學水土保持系碩士論文。
11. 林瑞仁，2003，開口式帶工對整治後溪流蜿蜒促成可行性之研究，國立屏東科技大學水土保持系碩士論文。
12. 張則安，1994，固床工間距之研究，國立中興大學水土保持學系碩士論文。
13. 連惠邦，2001，防砂壩下游河床演變及其整流工程配置模式之研究(一)，84 年度水土保持及集水區經營研究計畫成果彙編，農委會林業特刊第 50 號：541-549。
14. 陳沛霖，2006，圓弧型開口式固床工應用於野溪整治之研究，國立屏東科技大學水土保持系碩士論文。
15. 陳聖文，2000，防砂壩下游帶工佈置之試驗研究，國立中興大學土木研究所碩士論文。
16. 游繁結，1996，固床工間距之調查研究(三)，84 年度水土保持及集水區經營研究計畫成果彙編，農委會林業特刊第 50 號：541-549。
17. 劉世昌，1997，台東地區野溪帶工之研究，國立中興大學水土保持學系碩士論文。

18. Bennett, S.J., Alonso, C.V., Prasad, S.N., and Römken, M.J.M. 2000. Experiments on headcut growth migration in concentrated flows typical of upland areas, *Water Resour. Res.*, 36(7): 1911-19220.
19. Biedenharn, D.S. and Hubbard, L.C. 2001. Design considerations for siting grade control structures. US Army Corps of Engineers. ERDC/CHL CHTEN-VII-3.
20. Bockelmann, B.N., Fenrich, E.K., Lin, B., and Falconer, R.A. 2004. Development of an ecohydraulics model for stream and river restoration. *Ecological Engineering* 22: 227-235.
21. Breusers, H.N.C. and Raudkivi, A.J. 1991. Scouring. Rotterdam: A.A. Balkema.
22. Chow, V.-T. 1982. Open Channel Hydraulics. McGraw-Hill International Book Company.
23. Downs, P.W. and Thorne, C.R. 1998. Design principles and suitability testing for rehabilitation in a flood defence channel: the river Idle, Nottinghamshire, UK. *Aquat. Conservation Mar. Freshwater Ecosyst.* 8(1): 17-38.
24. Espa, P. and Sibilla, S. 2006. Experimental study of the scour regimes downstream of an apron for intermediate tail water depths, *In: River Flow 2006*, edited by Ferreira, Alves, Leal and Cardoso. Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics, Lisbon, Portugal, Sept. 6-8, Taylor & Francis: 1715-1724.
25. Fausch, K.D., Torgersen, C.E., Baxter, C.V., and Li, H.W. 2002. Landscapes to riverscapes: bridging the gap between research and conservation of stream fishes. *Bioscience* 52(6): 483-498.

26. Gaudio, R., Marion, A., and Bovolin, V. 2000. Morphological effects of bed sills in degrading rivers, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 38(2): 89-96.
27. Gordon, N.D., McMahon, T.A., and Finlayson, B.L. 1992. Stream Hydrology, An Introduction for Ecologists. John Wiley & Sons, Chichester.
28. Hey, R.D. and Thorne, C.R. 1986. Stable channel with mobile gravel beds. *Journal of Hydraulic Engineering* 112: 671-689.
29. Kemp, J.L., Harper, D.M., and Crosa, D.A. 2000. The habitat-scale ecohydraulics of rivers. *Ecological Engineering* 16(1): 17-29.
30. Lenzi, M.A., Marion, A., Comiti, F., and Gaudio, R. 2002. Local scouring in low and high gradient streams at bed sills, *Journal of Hydraulic Research* 40(6): 731-739.
31. Leopold, L.B. and Marchand, M.O. 1968. On the quantitative inventory of the riverscape. *Water Resources Research* 4 (4): 709-717.
32. Leopold, L.B., Wolman, M.G., and Miller, J.P. 1964. Fluvial Processes in Geomorphology. Freeman, San Francisco.
33. Marion, A., Lenze, M.A., and Comiti, F. 2004. Effect of sill spacing and sediment size grading on scouring at grade-control structures, *Earth Surface Processes and Landforms* 29: 983-993.
34. Pagliara, S. and M. Palermo, M. 2006. Scour protection downstream of block ramps, *In: River Flow 2006*, edited by Ferreira, Alves, Leal and Cardoso. Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics, Lisbon, Portugal, Sept. 6-8, Taylor & Francis: 1725-1730.
35. Poole, G.C. 2002. Fluvial landscape ecology: addressing uniqueness

- within the river discontinuum. *Freshwater Biology* 47L: 641–660.
36. Pringle, C.M., Naiman, R. J., Bretschko, G., Karr, J. R., Oswood, M.W., Webster, J.R., Welcomme, R.L., and Winterbourn, M.L. 1988. Patch dynamics in lotic systems: the stream as amosaic. *Journal of the North American Benthological Society* 7 (4): 503–552.
 37. Shamloo, H., Rajaratnam, N., and Katopodis, C. 2001. Hydraulics of simple habitat structures. *Journal of Hydraulic Research* 39(4): 351–366.
 38. Tregnaghi, M., Marion, A., and Comiti, F. 2006. Sediment supply effect on local scouring at bed sills in high gradient streams, In: *River Flow 2006*, edited by Ferreira, Alves, Leal and Cardoso. Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics, Lisbon, Portugal, Sept. 6-8, Taylor & Francis: 1759-1764.
 39. Vischer, D.L. and Hager, W.H. (ed.). 1998. Dam Hydraulics. Chapter 5: John Wiley & Sons.
 40. Ward, J.V., Tockner, K., Arscott, D.B., and Claret, C. 2002. Riverine landscape diversity. *Freshwater Biology* 47: 517–539.
 41. Wiens, J.A. 2002. Riverine landscapes: taking landscape ecology into the water. *Freshwater Biology* 47: 501–515.
 42. Wu, C.C. and Lin, Y.C. 2006. Diversity of streambed features caused by open-slot groundsills, In: River Flow 2006, edited by Ferreira, Alves, Leal and Cardoso. Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics, Lisbon, Portugal, Sept. 6-8, Taylor & Francis:1665-1671.
 43. Wu, C.C., Hou, C.H., Chen, C.N., and Shih, C.Y. 2002. Determination

- of groundsills interval for stream training, *In: River Flow 2002*, edited by D. Bousmar and Y. Zech. Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics, Louvain-La-Neuve, Belgium, Sept. 4-6. A.A. Balkema Publishers: 1109-1116.
44. Wu, C.C., Huang, P.C., Liao, W.L., Chung, Y.C., and Hsu, T.S. 2014. Effect of riprap protection in controlling local scour at the toe of a groundsill, *In: River Flow 2014*, edited by Schleiss, De Cesare, Franca and Pfister. Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics, Lausanne, Switzerland, Sept. 3-5, CRC Press: 2111-2118.
45. Wu, C.C., Lin, J.J., Lin, Y.C., and Yeh, C.M. 2004. The applicability of open-slot groundsills in trained river to encourage the formation of meandering, *In: Proceedings of the Conference on Self-sustaining Solutions for Streams, Wetlands, and Watersheds*, St. Paul, Minnesota, USA, Sept. 12-15, ASAE: 183-190.
46. Yalin, M.S. 1972. Mechanics of Sediment Transport. Pergamon, Oxford.

附錄

附錄一 期初工作執行計畫審查會議紀錄暨辦理情形回覆

水土保持系

表

訂

線

行政院農業委員會水土保持局 函

機關地址：54044南投市中興新村光華路6號
承辦人：高百毅
電話：049-2394300分機7215
傳真：049-2394307
電子信箱：baiyi96@mail.swcb.gov.tw

受文者：吳教授嘉俊(屏東科技大學水土保持系)

發文日期：中華民國107年5月22日

發文字號：水保治字第1071854192號

速別：普通件

密等及解密條件或保密期限：

附件：如主旨

主旨：檢送107年5月17日「107年度創新研究計畫(工程技術發展類)」期初審查會議紀錄(第二場)1份，請查照。

正本：江委員介倫(屏東科技大學水土保持系)、林委員信輝(中興大學水土保持學系)、游委員繁結(中興大學水土保持學系)、賴委員威昇(逢甲大學)、王委員晉倫、范委員世億、林委員仕修、吳教授銘順(逢甲大學)、潘教授乃欣(雲林科技大學)、吳教授嘉俊(屏東科技大學水土保持系)、黃博士正翰(財團法人臺灣營建研究院)、廖教授國偉(臺灣大學)、范教授正成(臺灣大學)、本局技術研究發展小組

電子信箱
mai4:mai30

副本：本局保育治理組

「107 年度創新研究計畫期初審查會議」(第二場)案

審查意見

SWCB(103.07 月版)

三、「透水式固床工之工法研發與水理特性研究(三)」案

1. E 型固床工之形態如何？
2. A、B、C、D 等型之共同性與差異性如何？其水理之差異性如何？
3. 無因次淘刷之迴歸公式如何呈現透水性之參數值？是否不同型式需建立不同之迴歸式？該參數是否需經常調整，以符實地？
4. 透水式固床工最終是否會形成不透水？是否重新淘刷趾部？其過程是否因透水率變化而造成下游面之不穩定？
5. 參考文獻需廣泛收集較近期之文獻。如水保手冊或其他學者、生態水文、生態水利學之相關研究。
6. A、B、C、D 固床工模型是否有對應之現地固床工實物照片案例？現場調查資料(通透率、沖刷)是否可輔助本計畫固床工模型水理分析之探討。
7. 由於水工模型縮尺難以完全理想，建議比較模型結果是否與現場現象大致吻合。(如 A 型可比較臺東與屏東現場)
8. 五個重複實驗之間距是否已足夠，避免受上游構造物影響。
9. 水工實驗室縮尺與現場相符狀況比對如何？
10. 固床工與塊石形狀、級配、透水率之最佳化？
11. 建議將實際施工與成本進行相關分析。

「透水式固床工之工法研發與水理特性研究(三)」
期初工作執行計畫審查意見答覆及辦理情形

審查意見	答覆說明及辦理情形
1.E 型固床工之形態如何？	1.感謝指導，E 型固床工的設計緣起與構想，惠請詳參 P.3-7～P.3-11。
2.A、B、C、D 等型之共同性與差異如何？其水理之差異性如何？	2.感謝指導，A、B、C、D 等型之共同性與差異性，惠請詳參 P.4-1～P.4-17；水理之差異性，惠請詳參 P.4-1～P.4-17；淘刷機制綜合整理，惠請詳參 P.4-18 表 1。
3.無因次淘刷之迴歸公式如何呈現透水性之參數值？是否不同型式需建立不同迴歸式？該參數是否須經常調整，以符實地？	3.感謝指導，透水性參數於本計畫前二年度執行期間原本期望以透水式固床工之通透結構阻塞率做為代表參數，並也嘗試尋求可適用於不同通透率之透水式固床工的單一迴歸公式，但檢討過去兩年試驗所見與資料分析結果，本年度決定將透水性（或阻塞率）參數刪除，變更後的結果仍在分析當中，將於期末報告中呈現。
4.透水式固床工最終是否會形成不透水？是否重新淘刷趾部？其過程是否因透水率變化而造成下游面之不穩定？	4.以本計畫過去兩年執行的結果研判，目前所研發及測試的透水式固床工確實有可能最終完全阻塞而再度回到傳統式固床工的趾部渠床嚴重淘刷問題上，這是本研究的目標之一；亦即從水工試驗中瞭解其現象，並設法找到可行的設計方案。

審查意見	答覆說明及辦理情形
	截至目前所研發及測試的四款透水式固床工通透結構，隨著通透結構的逐步改良，至去年度的 D 型透水式固床工，土砂阻塞的問題已藉由通透結構的設計改良而有所改善，本年度將進行 E 型透水式固床工的測試，E 型固床工的設計緣起與構想，惠請詳參 P.3-7 ~ P.3-11。
5.參考文獻需廣泛收集較近期之文獻。如水保手冊或其他學者、生態水文、生態水力學之相關研究。	5.感謝指導，目前已加強生態水文、生態水力學之相關研究文獻收集。
6. A、B、C、D 固床工模型是否有對應之現地固床工實物照片案例？現場調查資料(通透率、沖刷)是否可輔助本計畫固床工模型水理分析之探討。	6.本研究所測試的透水式固床工僅 A 型固床工出現於台東縣東河鄉羊橋溪段，實物照片請參閱 P.1-4 圖 1。其餘各型式的固床工乃本計畫嘗試設計、研發與測試。 至於現場調查 A 型固床工之通透率與沖刷，實有困難，因為目前現場實物之沖刷規模已無基準點可以參考。
7.由於水工模型縮尺難以完全理想，建議比較模型結果是否與現場大致吻合。(如 A 型可比較臺東與屏東現場)	7.本計畫之水工實驗並非將現場實體進行縮小，且本計畫之目的在於探討透水式固床工之可行性，因此若要將 A 型固床工室內實驗的結果與現場進行比對，實有困

審查意見	答覆說明及辦理情形
	難，而目前現場實物之沖刷規模已無基準點可以參考。
8.五個重複實驗之間距是否已足夠，避免受上游構造物影響。	8.系列固床工間距的選擇以及五個重複實驗安排的理由，惠請參閱 P.2-3 ~ P.2-5、P.2-9、P.3-1 ~ P.3-3。
9.水工實驗縮尺與現場相符比對如何？	9.本計畫之水工實驗並非將現場實體進行縮小，且本計畫之目的在於探討透水式固床工之可行性，因此純粹從水力學的角度出發。 而在實驗室內研發不同形式之透水式固床工結構時，必須同時考量未來實際施工之成本與可行性；換句話說，當透水式固床工結構經試驗證實可行之後，就結構體而言還原比例後，必須要有現成的材料可以施工。
10.固床工與塊石形狀、級配、透水率之最佳化？	10. 由於挾砂水流通過透水式固床工通透結構時的水流境況相當複雜，若考慮塊石形狀，實有困難。至於級配，本研究之試驗用砂採用三種不同中值粒徑之非均勻砂；而透水率則以通透結構體的通透率表示之。 有關委員所提建議尋求塊石形狀、級配、透水率之最佳化關係，實有困難。

審查意見	答覆說明及辦理情形
11.建議將實際施工與成本進行相關分析。	11.感謝指導，將於期末報告中針對透水式固床工的可行性、優缺點、施工成本、設計時應注意事項進行分析說明。

附錄二 期中審查會議紀錄暨辦理情形回覆

檔 號：

保存年限：

行政院農業委員會水土保持局 函

地址：54044南投市中興新村光華路6號
承辦人：高百毅
電話：049-2394300分機7215
傳真：049-2394307
電子信箱：baiyi96@mail.swcb.gov.tw

受文者：如行文單位

發文日期：中華民國107年8月31日

發文字號：水保治字第1071854578F號

速別：普通件

密等及解密條件或保密期限：

附件：如主旨ATTCH1

主旨：檢送107年創新研究計畫「透水式固床工之工法研發與水
理特性研究(三)」期中審查意見1份，請查照。

說明：

- 一、請貴校參照審查意見(詳附件)辦理。
- 二、貴校所提期中報告書，經審查通過，同意撥付第二期款。
如前期已撥經費已執行達60%以上，請檢送會計報告及製
據函送本局辦理撥款。

正本：國立屏東科技大學(吳嘉俊老師)

副本：本局保育治理組

行政院農業委員會水土保持局
「透水式固床工之工法研發與水理特性研究(三)」案
期中審查意見

1. 試驗設計之合理性宜有周延考慮，以 E 型採用浮球設計，雖具創意，惟浮球能否承受土砂流之撞擊及其浮力是否造成固床工之抬舉力增加而不穩，應詳加考慮現地之實務條件。
2. 表1，試驗土砂粒徑對應現地實務， D_{50} 均在42.5mm 以上，是否合宜？
3. 本研究既以透水式固床工為對象，何以透水率之影響因素不納進(22)式考慮之？(22)式又如何說明固床工之淘刷效益？
4. 圖15，在固床工上方流速註明"短暫加速"，何以得知？應是臨界流狀態？
5. 複迴歸分析之變異分析與 R^2 分析是屬同性質之分析，其推論之解釋有商榷之處。
6. 試驗資料豐富，可知努力度大，值得肯定，期待後續試驗之成果。
7. E 型透水式固床工框架內採用浮球，其是否足以承受土石衝擊？在實務應用上如何將其與固床工連結？

「透水式固床工之工法研發與水理特性研究(三)」
期中審查意見答覆及辦理情形

審查意見	答覆說明及辦理情形
1. 試驗設計之合理性宜有周延考慮，以 E 型採用浮球設計，雖具創意，惟浮球能否承受土砂流之撞擊及其浮力是否造成固床工之抬舉力增加而不穩，應詳加考慮現地之實務條件。	1.感謝指導。透水式 E 型固床工通透體仍保留金屬框架，該金屬框架於現場可以採用 H 型鋼或鋼軌材料為之。金屬框架具有保護內部浮球串的功能，至於浮球的詳細規格與耐壓說明，惠請參閱 P.4-19 ~ P.4-20。
2. 表 1，試驗土砂粒徑對應現地實務， D_{50} 均在 42.5mm 以上，是否合宜？	2.水工試驗無法考量現地床砂粒徑的多樣，亦無法考量現場出現巨粒的情況。然而，因次分析當中，將試驗所採用的土砂粒徑與固床工頂緣的水深合併成為 h/D_{50} ，並將之定義為土砂顆粒移動性時，就可以推估現地土砂粒徑更小或更大時的淘刷規模。至於渠床上出現巨粒所產生胃甲保護功能，或是溪床由極細土砂所組成的情境，非本研究所能考量。
3. 本研究既以透水式固床工為對象，何以透水率之影響因素不納入(22)式考慮之？(22)式又如何說明固床工之淘刷效益？	3. (22)式已刪除，但資料分析仍不考慮透水率參數，相關說明請參閱 P.4-26 ~ P.4-27。
4. 圖 15，在固床工上方流速註明"短暫加速"，何以得知？應是臨界流狀態？	4.感謝指導，圖 15 於期末報告已更新圖號為圖 16。對於意見的回覆，已補充說明，惠請參閱 P.4-1。

審查意見	答覆說明及辦理情形
5. 複迴歸分析之變異分析與 R^2 分析是屬同性質之分析，其推論之解釋有商榷之處。	5.感謝指導，已刪除不必要的解釋。
6. 試驗資料豐富，可知努力度大，值得肯定，期待後續試驗之成果。	6. 感謝指導。
7. E 型透水式固床工框架內採用浮球，其是否足以承受土石衝擊？在實務應用上如何將其與固床工連結？	7.感謝指導。透水式 E 型固床工通透體仍保留金屬框架，該金屬框架於現場可以採用 H 型鋼或鋼軌材料為之。金屬框架具有保護內部浮球串的功能，至於浮球的詳細規格與耐壓說明，惠請參閱 P.4-19 ~ P.4-20。 金屬框架除了提供保護內部浮球串的功能外，連接貫穿式浮球的尼龍纜線可固定於金屬框架內。

附錄三 期末審查會議紀錄暨辦理情形回覆

副 本

檔 號：
保存年限：

行政院農業委員會水土保持局 函

地址：54044南投市中興新村光華路6號
承辦人：陳國威
電話：049-2394300-7534
電子信箱：ckw@mail.swcb.gov.tw

受文者：本局保育治理組

發文日期：中華民國107年12月12日
發文字號：水保技字第1071860114號
速別：普通件
密等及解密條件或保密期限：
附件：會議紀錄1份

主旨：檢送本局107年12月4日召開「107年度創新研究計畫期末聯合審查會議紀錄」1份，請查照。

正本：國立雲林科技大學(營建工程系潘乃欣教授)、臺北市立大學(應用物理暨化學系古建國教授)、台灣農村發展規劃學會(鄭君璋助理教授)、國立臺灣海洋大學(河海工程學系許世孟助理教授)、國立成功大學(生理學科暨研究所蔡美玲副教授)、國立臺灣大學(氣候變遷與永續發展中心范正成教授)、國立嘉義大學(土木與水資源工程學系周良勳副教授)、社團法人臺灣省水土保持技師公會(蔡明波技師)、長榮大學(永續教育學院劉春初教授)、國立中興大學(水土保持學系陳樹群教授)、國立高雄科技大學(營建工程系盧之偉教授)、財團法人成大研究發展基金會(戴義欽副教授)、國立屏東科技大學(水土保持學系吳嘉俊教授)、財團法人台灣生態工法發展基金會(陳郁屏執行長)、逢甲大學(營建及防災研究中心吳銘順助理教授)、財團法人臺灣營建研究院(黃正翰博士)、國立高雄大學(災害防救科技研究中心吳明渠副教授)、國立交通大學(土木工程學系單信瑜副教授)、國立屏東科技大學(水土保持系陳天健教授)、國立臺北大學(金融與合作經營學系陳淑玲副教授)、逢甲大學(營建及防災研究中心謝孟勳研究助理教授)、財團法人台灣基督長老教會原住民教會(陳亮全顧問)、國立政治大學(地政學系范噶色Stephan van Gassel副教授)、國立臺北教育大學(社會與區域發展學系蔡元芳教授)、國立臺灣師範大學(地理學系沈淑敏副教授)、國立中興大學(水土保持學系王咏潔助理教授)、國立中興大學(土木工程學系陳豪吉教授)、國立中央大學(土木工程學系周憲德教授)、國立中興大學(水土保持學系洪啟耀助理教授)、國立臺灣大學(生物環境系統工程學系黃宏斌教授)、華梵大學(環境與防災設計學系鄭清江教授)、國立屏東科技大學(土木工程學系謝啟萬教授)、國立臺灣大學(生物環境系統工程學系廖國偉副教授)、逢甲大學(都市計畫與空間資訊學系雷祖強教授)、國立中興大學(水土保持學系宋國彰助理教授)、國立臺灣大學(土木工程學系葛宇甯教授)、明新科技大學(土木工程與環境資源管理系郭治平助理教授)、國立虎尾科技大學(資訊管理系蔡鴻旭教授)、國立嘉義大學(應用化學系李茂田教授)、國立成功大學(都市計畫學系張秀慈助理教授)、逢甲大學(地理資訊系統研究中心葉美伶研究助理教授)、國立雲林科技大學(創意生活設計系黃世輝教授)

副本：行政院農業委員會水土保持局臺北分局、行政院農業委員會水土保持局臺中分局、行政院農業委員會水土保持局南投分局、行政院農業委員會水土保持局臺

南分局、行政院農業委員會水土保持局臺東分局、行政院農業委員會水土保持局花蓮分局、本局林副局長室、本局王副局長室、本局主任秘書室、本局總工程司室、本局綜合企劃組、本局保育治理組、本局農村建設組、本局監測管理組、本局土石流防災中心、本局技術研究發展小組(均含附件)

內政部-108-13
交10:表08章



107 年度創新研究計畫期末成效評核表

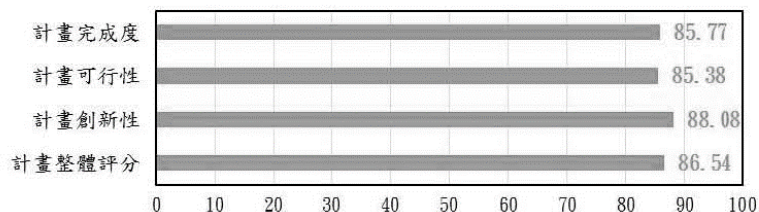
一、計畫編號: 107 保發-11.1-保-01-06-001(13)

二、計畫名稱: 透水式固床工之工法研發與水理特性研究(三)

三、計畫執行機關: 國立屏東科技大學

四、計畫主持人: 吳嘉俊

五、期末聯合審查評核問卷統計



六、審查意見:

1. 以鋼骨做為透水固床工之框架，是否合適？
2. 淘刷深入之公式是否有跟國外文獻比較？
3. 現地固床工之土砂粒徑與實驗室之土砂系統可能差異甚大，建議未來能將此因素納入考量。
4. 透水式固床工在施作上，有無其他限制條件或注意事項。
5. 建議針對於預算單價分析以及工作項目列出與傳統工法實際比例，俾利作為後續利用之參考。
6. 傳統性不透水性固床工易造成下游面之沖刷坑或基礎淘刷，而透水性固床工水頭差水量是否可防治淘刷問題。
7. 固床工下游水墊，可以採用挖深方式進行消能，效果在現地觀察比 PC 或鋼軌框架方式，也許可能更好。
8. 建議比較透水式固床工與傳統固床工之經費高低。

七、計畫主辦單位期末評核結果

請勾選 (單選)	☒ 通過，相關建議如上項說明
	☐ 修正後通過，修正事項如上項建議 說明：_____
	☐ 不予通過，辦理 ☐ 複審或 ☐ 計畫終止 說明：_____

**「透水式固床工之工法研發與水理特性研究(三)」
期末審查意見答覆及辦理情形**

審查意見	答覆說明及辦理情形
1. 以鋼骨做為透水式固床工之框架，是否合適？	1. 採用 H 型鋼或鋼軌做為透水式固床工的框架於國內已有現場試用之案例。之所以採用的理由在於施工方便，若以減少水泥用量的角度觀之，亦能達到目的。
2. 淘刷深入之公式是否有跟國外文獻比較？	2. 目前探討透水式固床工趾部渠床淘刷的相關研究，國內外均屬首例，因此國外並沒有相關的文獻可以比較。
3. 現地固床工之土砂粒徑與實驗室之土砂系統可能差異甚大，建議未來能將此因素納入考量。	3. 感謝指教，確實實驗室與現場的土砂粒徑存在差異，若要在有限的期間內測試各種不同的土砂粒徑大小與配比，有其困難。將試驗參數無因次化的原因之一，就是利用無因次將土砂粒徑因素的影響融入在試驗當中。但不可諱言，試驗仍有其適用的範圍。因此，建議未來有興趣的單位，可以增加試驗土砂粒徑分布範圍的廣度。
4. 透水式固床工在施作上，有無其他限制條件會注意事項。	4. 本研究的目的是在於評估透水式固床工的可行性，雖然已經獲得具體成果與建議，但仍需要現場實際施作，方能累積施作上的具體經驗。

審查意見	答覆說明及辦理情形
5. 建議針對於預算單價分析以及工程項目列出與傳統工法實際比例，俾利做為後續利用之參考。	5.感謝指教，傳統式固床工及透水式 A 型固床工的單價分析，詳參 P.4-33。
6. 傳統性不透水性固床工易造成下游面之沖刷坑或基礎淘刷，而透水式固床工水頭差水量是否可防治淘刷問題。	6. 透水式固床工的目的是在於降低固床工上下游的水頭差，但通透結構體的設計方式決定了水頭差降低的程度與其對於趾部淘刷的影響。
7. 固床工下游水墊，可以採用挖深方式進行消能，效果在現場觀察比 PC 或鋼軌框架方式，也許可能更好。	7.固床工下游於現場通常不加設水墊，倘若於固床工下游渠床挖深，反而惡化濱溪的生態環境。
8. 建議比較透水式固床工與傳統式固床工之經費高低。	8. 感謝指教，傳統式固床工及透水式 A 型固床工的單價分析，詳參 P.4-33。